

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”**

Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

До захисту допущено

Завідувач кафедри

(підпис) Н.І. Бурау
(ініціали, прізвище)
“ ” _____

Дипломна робота
освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр
(назва ОКР)

зі спеціальності 7.05100303 Прилади і системи орієнтації та навігації
(код та назва напряму підготовки або спеціальності)

на тему: Імітаційне моделювання триступеневого гіроскопа

Виконав: студент 4 курсу, групи ПГ-51в
(шифр групи)

Бельський Олег Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____
(підпис)

Керівник к.т.н., доцент, Цибульник С. О.
(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Рецензент к.т.н. Івасенко В.М.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі не-
має запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 р.

АНОТАЦІЯ

При проектуванні приладів часто допускаються помилки, які в свою чергу збільшують час розробки в кращому випадку, а часто і зупиняють виробництво на невизначений термін. Тому стало доцільно використовувати імітаційне моделювання для більш детального дослідження систем та явищ в режимах експлуатації без витрат на їхнє фізичне втілення. В даній роботі було проведене імітаційне моделювання триступеневого гіроскопа в процесі його роботи. В першому розділі було розглянуто види моделювання та їхні недоліки, також проведений огляд програмних засобів для імітаційного та геометричного моделювання. В другому розділі було проведене геометричне моделювання триступеневого гіроскопа, в середовищі SolidWorks було створену тривимірну модель. Також було описано методику проведення геометричного моделювання.

У третьому розділі було проведено імітаційне моделювання гіроскопа, розрахунок деформації під дією прецесії та динаміку роботи гіроскопа. З результатів імітаційного моделювання зроблено висновок про те як впливає прецесія на деформацію всього приладу.

Ключові слова: триступеневий гіроскоп, , імітаційне моделювання, геометричне моделювання, CAD, CAE, ANSYS, статичний аналіз, динамічний аналіз.

ABSTRACT

When designing devices, mistakes are often allowed, which in turn increase the time of development in the best case, and often stop production for an indefinite period of time. Therefore, it was expedient to use simulation for more detailed study of systems and phenomena in operating modes without the cost of their physical incarnation. In this work, the simulation of a three-stage gyroscope was carried out in the process of doing it. In the first section, the types of simulations and their disadvantages were considered, as well as an overview of the software for simulation and geometric modeling. In the second section, the geometric modeling of the three-stage gyroscope was conducted, a three-dimensional model was created in SolidWorks environment. A methodology for conducting geometric modeling was also described.

In the third section, simulation simulation of the gyroscope, calculation of deformation under the action of precession and dynamics of the gyroscope was conducted. From the results of simulation the conclusion is made of how the precession affects the deformation of the entire device.

Keywords: three-level gyroscope,, simulation modeling, geometric modeling, CAD, CAE, ANSYS, static analysis, dynamic analysis.

Зміст

ВСТУП	8
ОГЛЯД ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО ТА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	10
1.1 ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ	16
1.1.1 <i>AutoCad</i>	16
1.1.2 <i>SolidWorks</i>	17
1.1.3 <i>КОМПАС</i>	19
1.1.4 <i>CATIA</i>	20
1.2 СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ	21
1.2.1 <i>FlowVision</i>	21
1.2.2 <i>ANSYS</i>	23
1.2.3 <i>ABAQUS</i>	24
1.3. МЕТОДИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	26
1.3.1 МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	26
1.3.2 Побудова сіткової моделі (дискретизація геометричної моделі).....	28
ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	30
2.1 МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРИДОВИЩІ <i>SOLIDWORKS</i>	30
2.2 ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОТОРУ ГІРОСКОПУ	36
2.3 ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВИ ГІРОСКОПУ	43
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	49
3.1 АНАЛІЗ ДЕФОРМАЦІЙ	49
3.1.1 <i>Встановлення з'єднань</i>	50
3.1.2 <i>Встановлення навантажень</i>	63
3.1.3 <i>Результати</i>	66
3.2 МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ	70
2.5.1 <i>Зміна зв'язків</i>	72
2.5.2 <i>Налаштування обчислювача, задання кручення та результати</i>	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79

ВСТУП

Технології розвиваються досить швидко, і дозволяють побачити давно відомі речі під іншим кутом, більш наглядно показати те що часто складно побачити неозброєним оком. Розвиток комп'ютерних технологій значно спростив процес розрахунків та проектування приладів та систем. Якщо раніше потрібно було сидіти над розрахунками тижнями то зараз достатньо записати потрібні формули в програму і досить швидко все обрахувати, а наявність готових потужних математичних бібліотек економить час на реалізації складних алгоритмів. Потужні банки даних спрощують проведення дослідів, тому що на основі цих даних можна створювати регресивні моделі та прогнозувати яким повинен бути результат. За допомогою систем симуляції реальних об'єктів можна наглядно оцінити та побачити роботу того чи іншого приладу. Також з розвитком технологій віртуальної реальності появилася змога завантажувати свої моделі в середовище доповненої реальності, це дає змогу досить зручно і наглядно оцінити модель.

В даній роботі буде проведене імітаційне моделювання триступеневого гіроскопу при прикладенні постійних моментів до його рамок, щоб наглядно оцінити явище прецесії.

Гіроско́п — пристрій, здатний реагувати на зміну кутів орієнтації основи, на якій його встановлено, відносно інерціального простору.

Термін уперше введений Жаном (Бернаром Леоном) Фуко в його доповіді в 1852 році Французькій Академії Наук. Доповідь було присвячено способам експериментального виявлення обертання Землі в інерціальному просторі. Цим і зумовлено назву «гіроскоп».[1]

Поняття гіроскоп досить широке, зараз гіроскопами називають не лише класичні механічні системи до складу якої входить ротор, який швидко обертається, та елементи підвісу ротора які забезпечують йому дві або три обертові степені свободи, але й прилади які мало схожі на описану вище систему.

Наприклад в вібраційних, гідромеханічних, магнітогідромеханічних гіроскопах роль ротора виконує рідина яка коливається або обертається. [2]

Триступеневий механічний гіроскоп складається ротора, карданового підвісу на якому закріплений ротор та має три ступені свободи. Такі гіроскопи можуть використовуватися як гіроскопи напрямку, при наявності систем корекції.

Основним завданням гіроскопу є збереження положення головної осі, але в процесі експлуатації даного приладу часто виникають моменти сил, прикладені до рамок, що в свою чергу впливають на головну вісь гіроскопу, а саме вона починає обертатися. Таке явище називають прецесією, некерована прецесія може спричинити похибки при застосуванні даного пристрою.

Усі вище перелічені властивості визначаються технічними характеристиками гіроскопу, а саме: величиною кутової швидкості власного обертання та кінетичним моментом.

Основною ціллю даної роботи є дослідження прецесії гіроскопу та наглядно показати це явище за допомогою геометричного та імітаційного моделювання.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО ТА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Модель – абстрактне представлення реального процесу, пристрою чи концепції, що призначене для представлення певних аспектів реальності і дозволяє отримати відповіді на поставлені питання.

Терміном моделювання позначають як і створення так і дослідження моделі. Одна система може складатися з моделей різного виду. [3]

Моделювання завжди робиться з припущеннями різного роду та характеру, але не дивлячись на припущення потрібно зберігати наступні вимоги до моделей:

- Адекватність – відповідність моделі досліджуваній системі та наявність всіх необхідних зв'язків. Оцінити адекватність обраної моделі на початку моделювання коли є досить багато невідомих доволі складно. В таких ситуаціях використовують досвід минулих розробок та зазвичай опираються на метод послідовних наближень;
- Точність – ступінь наближення реальних результатів моделювання до бажаних, розрахованих заздалегідь чи отриманих експериментальним шляхом. Важливим завданням є оцінка потрібної точності результатів і точності вихідних даних, яку може забезпечити модель, узгодження їх як між собою;
- Універсальність – вимога що визначає чи можна застосовувати конкретну модель до ряду подібних, однотипних систем;
- доцільна економічність, тобто наскільки доцільно використовувати ресурси для створення та обрахунку конкретної моделі. Досить часто потрібно знаходити компроміс між витраченими ресурсами та часом моделювання, хоча і зараз з розвитком технологій можна затрачати більше ресурсів та отримувати результат швидше;

Основною, якщо не головною задачею моделювання являється забезпечення точності моделі та вибору її типу.

Похибки при виконанні моделювання зумовлюються доволі об'єктивними причинами пов'язаними в основному зі спрощенням реальних систем, а також браком інформації в досліджуваній області. Проте такі похибки зазвичай можна врахувати або запобігти їхню появу. Оцінку точності моделі проводять такими способами: [3]

- порівнюють відповідність результату фізичним властивостям реального об'єкта. Але такого роду перевірка вимагає досить великого досвіду роботи та повного розуміння того як працює система, для того щоб представляти якого характеру будуть отримані результати. Точність такого уявлення залежить тільки від розвиненості фізичної уяви та досвіду;
- перевіряють виконання очевидних умов при моделювання що дозволяє запобігти хибним рішенням;
- перевіряють дотримання зміни, попередньо дослідивши систему монотонність, циклічність, плавність і т. п.; [3]
- перевіряють дотримання розмірності отриманого результату (особливо при роботі з аналітичними виразами). [3]

Для того щоб точно провести розрахунки безглуздо використовувати грубі вимірювальні прилади та прилади які мають досить низьку точність. Проте коли потрібно використати обчислення наближено то недоцільно використовувати точні метрологічні прилади, тому важливо пам'ятати:

- точність результатів моделювання не може перевищити точність вхідних даних;
- вид обраної моделі повинен відповідати точності вимірювальних приладів та повинен бути обумовлений відповідно до точності очікуваного результату

- точність результатів не повинна виходити за рамки реальності, потрібно здорово оцінювати можливості.

За способом абстрагування від дійсності розрізняють лише три основні види моделей - евристичні, натурні (ще часто називають фізичними) та математичні:

Евристичні моделі - це абстрактні образи, що виникають у свідомості людини. Зазвичай такі моделі описуються на словах, таке представлення являється доволі суб'єктивним та неоднозначним. Ці моделі є формальні, вони не описуються математичними або логічними виразами, хоча вони й були створені при спостережанні над реальними природними явищами.

Евристичне моделювання – це в першу чергу спосіб для представлення чогось нового, зазвичай якась нова ідея яка ще немає будь-якої реалізації. Абстрактне мислення такого роду залежить лише від рівня уяви людини. Евристичні моделі використовують лише на початку моделювання коли потрібно представити архітектуру системи досить спрощено та лише для того щоб правильно розрахувати приблизні об'єми роботи. Згодом такі моделі замінюють на більш точні, наприклад математичні чи натуральні.

Натуральні моделі – це моделі які є досить подібними до реальних систем, а відмінність може полягати в розмірах, матеріалі елементів, тощо. Саме фізичні моделі набули досить широкого застосування. Такі моделі являються певного роду копіями досліджуваних об'єктів - випадок при якому між параметрами системи і моделі ідентичних фізичних ознак присутній доволі тісний зв'язок. Розміри таких моделей зазвичай проектують в певному масштабі з розмірами реального фізичного об'єкта. Фізичні моделі поділяють на об'ємні та плоскі або по іншому макети та тремплети: [3]

- у цьому випадку під моделлю - це система або прилад, який являється спрощенням досліджуваного об'єкта або дозволяє змоделювати досліджуваний процес чи явище. Це можуть бути зменшені моделі, які є точними копіями досліджуваних об'єктів але виконані в певному масштабі;

- тремплет – виріб який являється плоским відображенням об'єкта, виконаний з певним масштабом, та представлений як спрощена ортогональна проекція або контурне креслення. Тремплете вирізають з картону або плівки та зазвичай використовують при проєктуванні чи дослідженні споруд, будинків, різного плану установок, тощо.
- макет це поєднання моделі та тремплета.

Фізичне моделювання дозволяє перевіряти гіпотези та результати розрахунків. Фізичне моделювання охоплює все різноманіття явищ, процесів та систем. Проте це досить важкий метод моделювання що потребує досить велику кількість ресурсів. Це трудомісткий і доволі дорогий процес, який не являється універсальним. Але попри це з фізичними моделями впродовж усіх можливих етапів розробки.

Математичні моделі – складаються із сукупностей різних взаємопов'язаних математичних і логічних виразів, що в повинні в повній мірі відображати реальні процеси і явища (фізичні, психічні, соціальні і т. Д.). За формою подання бувають: [3]

- аналітичні моделі. При таких випадках рішення задачі знаходять в замкненому вигляді, як функціональні залежності. Досить зручні при описі суті процесу чи явища проте потребують досить серйозних затрат на розрахунки. Вони використовуються в математичних моделях, хоча пошук рішень буває досить складним;
- чисельні моделі. Їх рішення – таблиці, це дискретний чисельний ряд. Такі моделі є універсальні та зручні коли потрібно вирішити складну задачу. Основним недоліком таких моделей є те що вони досить трудомісткі при аналізі і встановленні взаємозв'язків, з ними досить складно працювати без обчислювальної техніки. Тому такі моделі відтворюють у вигляді програмних комплексів для розрахунків – програмні пакети. Програмні пакети такого роду бувають як і універсальними і складаються з бібліотеки великої кількості

математичних примітивів чи можуть бути підігнані під конкретну досліджувану область;

- формально-логічні інформаційні моделі - це моделі, створені на формальній мові

Розрізняють наступні способи побудови математичних моделей:

- аналітичний – обумовлення за допомогою математичних формул, які впливають з теорем та аксіом, фізичних законів;
- експериментальний – при обробці отриманих експериментальних даних та підбору прогнозуючого чи апроксимуючого алгоритму, або навчання штучної нейронної мережі та отримання графа для прогнозування.

Математичні моделі являються найбільш дешевими та універсальними, а також надають можливість поставити ідеальний експеримент (тобто в межах точності моделювання досліджувати вплив лише конкретного параметра, при тому що інші будуть залишатися незмінними), прогнозувати розвиток експерименту над процесом чи конкретним явищем, знайти способи управління ним. Математичні моделі лягли в основу комп'ютерних моделей і широко використовуються в обчислювальній техніці.[1]

Результати математичного моделювання обов'язково потрібно перевіряти та співставляти з результатами фізичного моделювання, для того щоб перевірити отримані дані чи можливо доповнити модель і тим самим підвищити точність.

З розвитком технологій можна проводити комп'ютерне моделювання систем з досить високою точністю за допомогою CAE та CAD систем. Таке моделювання називають імітаційним. При імітаційному моделюванні математично реалізований алгоритм відтворює процес функціонування системи в часовому інтервалі. Імітуються прості явища, що являють собою процес який зберігає в собі логічні умови та так само послідовно протікає в часовому інтервалі.

Основною перевагою імітаційних моделей в порівнянні з аналітичними є можливість вирішення набагато складніших завдань. Імітаційні моделі дають можливість досить легко враховувати наявність дискретних або цілих

елементів, їхні нелінійні характеристики, вплив випадкових характеристик та ін. Тому цей метод широко застосовується на етапі проектування складних систем. Основним засобом реалізації імітаційного моделювання служить САЕ система, що дозволяє здійснювати цифрове моделювання систем і сигналів.

В імітаційному моделюванні використовується модель відтворює алгоритм та фізику життєвого циклу досліджуваної системи в часовому інтервалі при різних поєднаннях початкових умов системи та навколишнього середовища. Прикладом найпростішої аналітичної моделі може бути рівняння прямолінійного рівномірного руху. При дослідженні процесу такого характеру за допомогою імітаційної моделі має бути реалізовано спостереження за зміною пройденого шляху в часовому інтервалі. [4]

В одному випадку аналітичне моделювання є більш прийнятним і краще відтворить досліджувану систему, але й буває навпаки, імітаційне (або поєднання цих маделювань).

Імітаційні моделі не тільки відповідають всім властивостям модельованого об'єкта, але і відворюють повною мірою структуру. При цьому є повна відповідність між процесами та явищами які відтворює модель і процесами які протікають на досліджуваному об'єкті. Недоліком імітаційного моделювання є великий час вирішення завдання для отримання хорошої точності.

Результатом імітаційного моделювання роботи стохастичною системою є реалізаціями випадкових величин або процесів. Тому для знаходження характеристик системи потрібно не один раз повторити моделювання і для кожного разу знову проводити обробку даних. Зазвичай при таких випадках використовують різновид імітаційного моделювання, такий як статистичне моделювання (або метод Монте-Карло), тобто відтворення в моделях випадкових факторів, певного роду подій, які провокують зміну тих чи інших величин, випадкових процесів, полів, які будуть спрямовані на об'єкт. За результатами статистичного моделювання визначають оцінки імовірнісних критеріїв якості. Вони бувають загальними та приватними, а також характеризують функціонування і ефективність керованої системи. Статистичне моделювання

широко застосовується для вирішення наукових і прикладних задач в різних областях науки і техніки. Методи статистичного моделювання широко застосовуються при дослідженні складних динамічних систем, насамперед оцінці їх функціонування і ефективності та наочності процесів які протікають в таких системах, зазвичай для неозброєного ока це досить складно.

Заключний етап статистичного моделювання полягає у математичній обробці отриманих результатів. В такій обробці використовують методи математичної статистики (перевірку гіпотез, параметричне і непараметричне оцінювання)

1.1 Геометричне моделювання в системах автоматизованого проектування

1.1.1 AutoCad

AutoCad (Automated Computer Aided Drafting and Design) - двоовимірна і тривимірна система автоматизованого проектування, розроблена компанією Autodesk. Перша версія системи була випущена в 1982 року. AutoCAD і спеціалізовані додатки, які увійшли в програмний комплекс, знайшли широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні та приладобудуванні. Програма має досить хорошу адаптацію і підтримує 18 мов. Рівень локалізації доволі різний, від повної адаптації мовного пакету до перекладу тільки довідкової документації. Російськомовна повністю локалізована і вбудована в інтерфейс командного рядка і всю документацію. [5]

В області двовимірного проектування AutoCAD, дозволяє використовувати елементарні графічні елементи, які ще називають примітивами, такі як лінія, коло, точка, тощо, для побудови більш складних об'єктів. Крім того, програма надає досить широкі можливості роботи з кресленнями, дозволяє розбивати один об'єкт на декілька шарів і працювати з анотаційними об'єктами (розмірами, текстом, позначеннями). Використання механізму зовнішніх посилань (XRef) досить зручне і дозволяє дискретизувати одне креслення на декілька файлів, що досить

зручно для роботи в команді. Завдяки динамічним блокам користувачі без використання програмування. Також мова програмування загального призначення LISP являє собою досить зручний інструментарій для створення шаблонів примітивів різного роду. [6]

AutoCAD надає повний набір інструментів для 3D проектування, також можна імпортувати деталі в інші програмні засоби.

З нових можливостей AutoCAD можна виділити досить зручну річ для сучасної людини таку як підтримка хмарних сховищ. В ході розвитку програмного пакету було створено веб додаток, в якому так само можна редагувати та розробляти креслення на будь-якому пристрої що під'єднаний до мережі інтернет, також був створений і мобільний додаток з меншим функціоналом. Перевагою хмарних сховищ є доступність матеріалів будь де та будь коли а також їхнє резервне зберігання, що запобігає втраті цінних файлів. Також додана підтримка мови JavaScript.

Також AutoCAD вміщає в себе доволі корисні модулі. Модуль Architecture спрощує роботу в створенні плану етажів, фасадів та інших елементів споруд. AutoCAD Electrical додає змогу проектувати електричної мережі для створення, зміни та документування електричних управляючих систем. Модуль MAP 3D створений для розробки планів місцевості, ландшафту та вміщує в собі базу топології ГІС.

1.1.2 SolidWorks

SolidWorks - програмний комплекс САПР для автоматизації робіт підприємства на етапах розробки конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Забезпечує розробку виробів будь-якого рівня складності і призначення. Програмне забезпечення доступне для операційних систем сімейства Microsoft Windows. Розроблено SolidWorks Corporation, створеної Джоном Хірштіком, пізніше у 1997 році є підрозділом компанії Dassault Systemes

(Франція). Розробка програмного забезпечення розпочалася у 1993 році, перший програмний комплекс був доступний для продажу у 1995 і створив конкуренцію таким продуктам: AutoCAD і Autodesk Mechanical Desktop, SDRC I-DEAS і Pro / ENGINEER. Програмний комплекс SolidWorks – це перший САПР, який підтримує твердотільне об'ємне моделювання для операційних систем Windows. [7]

В SolidWorks можна однаково успішно працювати як з об'ємними тілами, так і з плоскими поверхнями. Зазвичай, деталь являє собою тверде тіло, поверхня якого це поєднання різноманітних форм будь-якого характеру. Процес побудови 3D-моделі полягає у створенні простих геометричних примітивів та на виконанні різних операцій над ними. Модель складається зі стандартних елементів, що часто називають блоками і може бути змінена шляхом додавання або видалення цих елементів, або зміни параметрів блоків.

Характеристики 3D-моделі поною мірою описують фізичні властивості об'єкта (обсяг, маса, моменти інерції) і дають конструктору змогу працювати в віртуальному 3D-просторі. Це надає досить точно відтворити комп'ютерну модель до вигляду майбутнього виробу та виключити громіткий етап макетування. [7]

Останнім часом розробники SolidWorks приділяють досить багато уваги роботі зі збірками, кількість компонентів яких може становити десятки і сотні тисяч одиниць. Моделювання такого роду збірок потребує досить багато ресурсів комп'ютера навіть тоді коли не брати до уваги зв'язки між деталями, тому в нових версіях програмного комплексу включений спеціальний монітор ресурсів, що правильно розділяє процеси в окремі потоки та вмикає файли підкачки при високому завантаженні оперативної пам'яті.

У стандартну конфігурацію SolidWorks входить модуль швидкого аналізу міцності – COSMOSXpress – це більш легка версія програми COSMOS / Works і призначена насамперед для інженерів-конструкторів які не володіють широкими знаннями в теорії кінцево-елементного аналізу міцності. Даний модуль дає можливість конструктору урахувати де розташовані концентрації напружень,

оцінити де можна зменшити кількість матеріалу без втрати міцності тим самим полегшити деталь та зробити її вартість в виробництві меншою.

COSMOSXpress виконаний у вигляді програми-помічника, що вказує користувачеві послідовність кроків, які потрібні для ініціалізації розрахункової моделі і проведення моделювання для аналізу. Вікно роботи з COSMOSXpress, як і SolidWorks, також перекладений російською мовою.

В програмному комплексі SolidWorks не можна автоматично створювати креслення до відповідної тривимірної моделі, виключаючи помилки конструктора, що зазвичай виникають при зображенні об'єкта на кресленні вручну. SolidWorks підтримує наступні стандарти креслень: GOST, ANSI, ISO, DIN, JIS, GB і BSI. Креслення SolidWorks володіють двостороннім зв'язком з тривимірними моделями, таким чином розміри на кресленнях завжди відповідають розмірам тривимірної моделі.

До складу базового програмного комплексу SolidWorks входить спеціальний інтерфейс для розробки користувачем програмного доповнення - SolidWorks API (Application Programming Interface). API-інтерфейс містить бібліотеку функцій, які можна використовувати з програм Microsoft Visual C ++, Visual Basic, VBA (Excel, Word і т.д.) або спеціалізованих макросів SolidWorks. Даний інтерфейс разом з бібліотекою відкривають програмісту прямий доступ до можливостей САПР SolidWorks і дозволяють провести автоматизацію якогось специфічного процесу. Цей інтерфейс входить в базовий комплекс SolidWorks та надається безкоштовно.

1.1.3 КОМПАС

«КОМПАС-3D» - система автоматизованого проектування, розроблена компанією «АСКОН». Даний програмний інтерфейс надає можливість реалізувати класичний процес тривимірного параметричного проектування починаючи від ідеї проектування об'єкта і закінчуючи процесом оформлення конструкторської документації. Програми сімейства «КОМПАС-3D» автоматично генерують

асоціативні та абстрактні види тривимірних моделей (різного роду види, розрізи, перерізи, розрізи по лінії і т.п.). Основним складовими програмного комплексу являється система твердотільного тривимірного моделювання, різноканальна система автоматизованого проектування КОМПАС-Графік і модуль розробки та наповнення специфікацій. [8]

Система «КОМПАС-3D» створена для тривимірного моделювання об'єктів та складальних одиниць. Параметрична обробка дозволяє проектувати об'єкти на основі створеного прототипу. Велике різноманіття сервісів полегшує вирішення різного роду допоміжних завдань.

Компанією «АСКОН» також були створені різні додатки для тривимірного моделювання. Ці програмні засоби доповнюють «КОМПАС-3D» інструментами для проектування спеціалізованих інженерних об'єктів. Розподілена система модулів надає користувачеві можливість обрати тільки необхідні пакети для вирішення конкретного завдання що економить ресурси затрачені на обробку.

- «КОМПАС-Shaft 3D» (проектування валів з елементами механічних передач та зачеплень)
- «Кабелі й джгути 3D» (3D-моделювання електричних кабелів та проектування специфічної конструкторської документації)
- «Металоконструкції 3D» (автоматизація проектування різного роду металевих каркасів) [8]

1.1.4 CATIA

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) - САПР французької фірми Dassault Systemes.

Це комплексна система автоматизованого проектування (CAD), технологічної підготовки виробництва (CAM) та інженерного аналізу (CAE), що включає в себе передовий інструментарій тривимірного моделювання, підсистеми програмної імітації складних технологічних процесів, розвинені засоби аналізу і єдину базу даних текстової та графічної інформації. [6]

CATIA пропонує унікальні можливості для моделювання будь-яких продуктів і дозволяє робити це в контексті їхньої поведінки в реальних умовах. Функціональні можливості CATIA на базі платформи Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE: [9]

- Середовище соціального проектування на базі єдиного джерела перевірених даних і доступу за допомогою функціональних інформаційних 3D-панелей, бізнес-аналітики, паралельної розробки та співпраці всіх учасників (включаючи мобільних співробітників) в режимі реального часу.
- Зручне рішення 3DEXPERIENCE з можливостями 3D-моделювання світового рівня допомагає оптимізувати поточну проектну діяльність як професійних, так і непрофесійних користувачів.
- Комплексна платформа для розробки продуктів легко інтегрується з існуючими процесами і інструментами. Це дозволяє використовувати потужні і інтегровані спеціалізовані додатки для різних дисциплін на всіх етапах процесу розробки продуктів.

Основним недоліком даної системи являється ціна.

1.2 Системи автоматизації інженерних розрахунків

1.2.1 FlowVision

Програмний продукт FlowVision компанії ТЕСИС є багатофункціональною системою, яка дозволяє моделювати тривимірну модель для рідини і газу в технічних і природних об'єктах.

Ця програма побудована на рішенні тривимірних (як стаціонарних, так і нестаціонарних) рівнянь динаміки речовин в газоподібному і рідкому станах. Тобто можна змоделювати протягом стаціонарних і нестаціонарних, що стискаються, слабосжимаємих і нестискуваних потоків рідини і газу. Також програма враховує всі закони збереження маси, рівняння Нав'є-Стокса і рівняння

стану. До речі в програмному комплексі FlowVision є математичне врахування при проектуванні таких фізичних явищ як горіння, турбулентність, пористість середовища, контактні кордону розділу і інших явищ, які виникають при складних рухах газу і рідини. [10]

САПР FlowVision заснована на таких технологіях обчислення гідродинаміки і графіки як:

- розрахункова сітка з подрібненням розрахункових осередків;
- апроксимація криволінійних кордонів на розрахунковій області за допомогою методу подсеточной дозволу геометрії;
- мова написання програмного ядра C ++; - використання графіки на основі OpenGL.

У програмі FlowVision одночасно працюють препроцесор, вирішувач, а також постпроцесор. Це дозволяє під час моделювання виробляти візуалізацію значень кожної з газодинамічних змінних, проводити заміну граничні умови математичної моделі і багато іншого.

FlowVision застосовується в різних галузях промисловості, починаючи від енергетики і закінчуючи авіабудівельними підприємствами. Так, в автомобільній промисловості програма застосовується для:

- визначення коефіцієнтів опору кузова автомобіля зустрічним повітряним потокам;
- моделювання процесу горіння палива в камерах згоряння.

В аерокосмічній галузі:

- моделювання ступеня обтікання фюзеляжів літаків і ракет;
- моделювання вентиляції та пожежної безпеки авіасалонів. В будівництві:
- моделювання вітрових навантажень на будівлі і споруди.

В екології: моделювання поширення забруднень в повітряному і морських басейнах. [10]

1.2.2 ANSYS

ANSYS - це програмний пакет кінцево-елементного аналізу, вирішальний завдання в різних областях інженерної діяльності (міцність конструкцій, термодинаміка, механіка рідин і газів, електромагнетизм), включаючи пов'язані багатодисциплінарного завдання (термоміцності, магнітопружності тощо). [11]

Лінійка продуктів ANSYS Inc., у тому числі продукт Mechanical, надає можливість вирішити імітаційним шляхом будь-яке завдання механіки деформованого твердотілого елемента або отримати комплексне рішення задачі механіки з рішеннями різних завдань інших областей фізики, наприклад гідрогазодинаміки, теплопереносу або електромагнетизму. Даний продукт пропонує можливість створення єдиної фундаментальної (мультифізичної) матриці взаємодії полів, підтримуючи акустичний, п'єзоелектричний, термоміцний і термоелектричний типи аналізу. При наявності продукту ANSYS CFD або ANSYS Emax також можна провести аналіз взаємодії конструкції з різними текучими середовищами або електромагнітними полями відповідно. Подібні розрахунки допомагають інженеру краще оцінити реакцію їх моделей на всілякі комбінації явищ. [6]

CFD-додатки ANSYS інтегровані в єдину ANSYS Workbench платформу, яка є основою для передових технологій інженерного моделювання. Ця проста у використанні платформа забезпечує доступ до двобічної параметричної CAD інтеграції, потужні інструменти для побудови сітки, автоматизований механізм оновлення на стадії проектування, управління багатодисциплінарного моделюванням і вбудовані інструменти оптимізації.

Математичні моделі властивостей матеріалів дозволяють описувати метали, чавун, гуму, пластмаси, композиційні матеріали, пружні і тендітні піни, бетон, пісок і глину, причому відгук матеріалу для кожної з цих моделей може бути нелінійним. Передбачені лінійні і нелінійні пружні, упругопластические і пружнов'язкопластичних закономірності. Можуть бути змодельовані як ізотропні,

так і анізотропні матеріали, а також створені матеріали, визначені користувачем за допомогою підпрограм.

Граничні умови можуть включати в себе запропоновані кінематичні умови (закріплення в одній точці або багатоточкові зв'язку) і запропоноване стан підстави. Умови навантаження можуть включати зосереджені сили, розподілене навантаження і теплове навантаження. Спеціальні засоби для опису сил, що діють на компоненти збірки, дають можливість вводити безпосередньо в модель навантаження від болтів і інших кріпильних деталей. Силкові ефекти стежить навантаження, такі як тиск, відцентрові і коріолісову сили, можуть бути використані там, де це необхідно. Можливо також завдання навантажень і граничних умов для опису тиску в порах і електричної напруги. Можуть бути задані початкові умови для температур, швидкостей, напруг і інших полів. [11]

1.2.3 ABAQUS

Програмний скінченно-елементний комплекс ABAQUS – універсальна система загального призначення, що може використовуватись, як для проведення багатоцільового інженерного багатодисциплінарного аналізу, так і для науково-дослідних і навчальних цілей у самих різних сферах діяльності, у числі яких [6]:

- автомобілебудування (компанії BMW, FORD, General Motors, Mercedes, Toyota, Volvo, GoodYear);
- авіабудування та оборонна промисловість (General Dynamics, Lockheed Martin, US Navy, Boeing);
- електроніка (HP, Motorola, IBM, Digital);
- металургія (British Steel, Dupont);
- виробництво електроенергії (ABB, AEA Technology, EPRI, «Атоменергопроект»);

- нафтовидобуток і переробка (Exxon / Mobil, Shell, Dow);
- виробництво товарів народного споживання (3M, Kodak, Gillette);
- загальна механіка і геомеханіка (GeoConsult, ISMES, «Гидропроект») [6].

Програмний комплекс ABAQUS спочатку був орієнтований на вирішення найскладніших і відповідальних завдань, з урахуванням всіх видів нелінійностей, а також на проведення багатодисциплінарного статичного і динамічного аналізу в рамках єдиного алгоритму. Така концепція вигідно відрізняє ABAQUS від інших програм подібного рівня (програмний комплекс ANSYS для аналізу сильно нелінійних і швидкоплинних процесів використовує сторонню програму LS-DYNA), що дозволяє за допомогою ABAQUS в рамках єдиного підходу вирішувати багатоцільові завдання, поєднуючи переваги явною і неявній схем кінцево елементного аналізу і їх комбінацію. [12]

ABAQUS пропонує відкритий підхід до вирішення складних проблем і надає необмежені можливості по підключенню призначених для користувача програм на всіх етапах розрахунку конкретної задачі. Необхідно також відзначити надійність програмного комплексу ABAQUS. Строгий контроль за збіжністю рішень досліджуваних процесів, автоматичний вибір кроку інтегрування, моніторинг завдання на всіх етапах розрахунку, численні функції контролю.

ABAQUS тісно інтегрований практично з усіма CAD-системами, має власний потужний сучасний препостпроцесор ABAQUS / CAE. Можлива і зв'язок через інтерфейси з іншими програмними продуктами, такими як ADAMS (кінематика і динаміка вузлів і механізмів), SYSNOISE (акустика і віброакустика), Moldflow (лиття пластмас) і FlowVision (аеро- і гідродинаміки).

Програмний комплекс ABAQUS доступний на всіх стандартних платформах - від персональних комп'ютерів з Windows NT / 2000 / XP до робочих станцій під UNIX і суперкомп'ютерів. [12]

Програмний комплекс ABAQUS розроблений по модульному принципу й складається із двох основних модулів-обчислювачів (солверів) – ABAQUS/Standard і ABAQUS/Explicit, пре/постпроцесор ABAQUS/CAE, а також деяких додаткових модулів [6].

ABAQUS дозволяє використовувати різні методи аналізу в тимчасовій і частотній області. Ці методи поділяються на два класи: узагальнені типи аналізу (в яких завдання може бути лінійною або нелінійною) і лінеаризоване аналіз (в якому лінійний відгук моделі розраховується щодо спільного - можливо, нелінійного - вихідного стану). Один розрахунок може включати різні типи аналізів.

ABAQUS написаний на мовах Fortran, C і C ++, що дозволяє використовувати його на більшості стандартних комп'ютерів. Коди підтримують повну подвійну і повну одинарну точність в залежності від типу комп'ютера. ABAQUS / CAE підтримує стандартні графічні дисплеї і графічні. ABAQUS не має внутрішніх обмежень за обсягом завдання.

Беручи до уваги доступні ресурси та функціональні можливості розглянутих вище CAD-систем і CAE-програм, для геометричного моделювання обрано програмний комплекс SolidWorks, а для імітаційного – ANSYS.

1.3. Методи імітаційного моделювання

1.3.1 Метод скінченних елементів

Реальні конструкції зазвичай поєднують у собі об'єкти складної форми, які у свою чергу можуть складатися з різних матеріалів. Для вирішення задач проектування та моделювання конструкцій складної форми застосовують такий чисельний метод, як метод скінченних елементів.

Аналіз методом скінченних елементів ґрунтується на дискретизації досліджуваної області (об'єкту) і розподілу її на елементарні частинки. Такі

частинки називають скінченими елементами. Вони можуть мати різну форму. Однак на відміну від чисельних методів, що ґрунтуються на математичній дискретизації диференціальних рівнянь, метод скінчених елементів базується на фізичній дискретизації розглянутого об'єкта. Таким чином реальна конструкція з нескінченно великим числом ступенів свободи замінюється дискретною моделлю пов'язаних між собою елементів з кінцевим числом ступенів свободи та відомою математичною моделлю. Так як число можливих дискретних моделей для нерозривної області необмежено велике, то основне завдання полягає в тому, щоб вибрати таку модель, яка найкраще апроксимує дану область та задіює при цьому найменше обчислювальних ресурсів.

Сутність апроксимації суцільного середовища по методу скінчених елементів полягає в наступному:

1. Розглянута область розбивається на певну кількість скінчених елементів, сімейство елементів по всій області називається системою або сіткою скінчених елементів.
 2. Передбачається, що скінчені елементи з'єднуються між собою в кінцевому числі точок – вузлів, розташованих по контуру кожного з елементів;
 3. Для кожного скінченого елемента задається апроксимуючий поліном.
- [13]

Ступінь апроксимуючого полінома визначає число вузлів, яким повинен володіти елемент. Шукані функції в межах кожного скінченого елемента (наприклад, розподіл переміщень, деформацій, напруг і т. д.) за допомогою апроксимуючих функцій виражаються через вузлові значення, що представляють собою основні невідомі методу скінчених елементів.

1.3.2 Побудова сіткової моделі (дискретизація геометричної моделі).

У різних програмах аналізу є спеціальні засоби генерації довільної сітки, за допомогою яких вона може наноситься безпосередньо на модель досить складної геометрії. Генератори довільної сітки володіють широким набором функцій управління якістю сітки. Наприклад, у програмі ANSYS реалізовані алгоритми зміни розміру скінченного елемента в залежності від зміни розглянутої геометрії, що дозволяє будувати сітку елементів з урахуванням кривизни поверхні моделі і найкращого відображення її реальної геометрії.

Від складності сітки залежить розмір глобальної матриці жорсткості, чисельна складність завдання і обсяг необхідних обчислювальних ресурсів. Точність рівняння можна підвищити збільшенням кількості скінчених елементів або використанням їх форми більш високих порядків. [13]

Розмірність елементів повинна співпадати з розмірністю області завдання: для одновимірних задач використовуються одновимірні елементи, для двовимірних – двовимірні, і т. д. Нарешті, в зонах, де очікуються різкі зміни невідомих (наприклад, зосереджені навколо отворів напруження), щільність (кількість) вузлів та скінчених елементів повинна бути вище, ніж в областях з плавною зміною невідомих.

Створення сітки є невід'ємною частиною процесу комп'ютерного інженерного моделювання (CAE). Якість сіткової моделі впливає на точність, збіжність і швидкість отримання рішення. Крім того, час, необхідний на створення сітки, часто займає значну частину загального часу виконання розрахунку. Тому якісні і більш автоматизовані інструменти побудови сітки дають кращий результат. Інструменти для створення сіток від компанії ANSYS дозволяють генерувати сіткові моделі, для різних типів аналізу (практично всі галузі фізики). Кожен з методів генерації сітки задовольняє специфічним вимогам тієї чи іншої області (механіка деформівних твердих тіл, інаміка текучих середовищ, електромагнетизм та ін.), дозволяє використовувати спрощену постановку задачі.

Методи побудови сітки

1. Методи побудови тетраедричних сіток:

- На основі поверхневої сітки (Patch conforming).
- Незалежно від поверхонь (Patch independent).
- CFX-Mesh.

2. Методи побудови гексаедричних сіток:

- Звичайна сітка протягуванням (Sweep).
- Сітка протягуванням для оболонкових тіл (Thin sweep).
- Багатозонна (на основі блокової сітки ICEM CFD).
- З переважанням гексаедрів.

3. Побудова на поверхні:

- Автоматична сітка чотирикутників, або поєднання трьох-і чотирикутників, або тільки трикутників.

- Рівномірна сітка чотирикутників, або поєднання трьох-і чотирикутників.
- Одновимірною сітка (балки, стрижні)

РОЗДІЛ 2

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В інженерному аналізі моделі розділяють на чотири основні типи:

- Геометрична модель
- Розрахункова модель
- Сіткова модель
- Імітаційна модель

Геометрична модель являє собою в точності відтворену геометрію реального об'єкта в САД-системі.

Розрахункова модель – це спрощена геометрична модель. Для спрощення всі деталі які не суттєво впливають на результати аналізу видаляються.

Сіткова модель – це сукупність вузлів та елементів на які була дескретизована геометрична модель. Дескретизація проводиться в САЕ-програмі.

Імітаційна модель являє собою сукупність сіткової моделі та накладених граничних умов.

Для моделювання прецесії гіроскопу розглянемо створення названих вище моделей.

2.1 Моделювання в середовищі SolidWorks

Система автоматизованого проектування SolidWorks (SolidWorks Corp., США) створена для використання на персональному комп'ютері в операційному середовищі Microsoft Windows. В SolidWorks використовується принцип тривимірного твердотілого і поверхневого параметричного проектування, що дозволяє конструктору створювати об'ємні деталі і компоувати збірки у вигляді тривимірних електронних моделей, за якими створюються двомірні креслення і специфікації відповідно до вимог єдиної системи конструкторської документації (ЕСКД).

Більшість елементів створюються на ескізі, по якому будується тривимірна деталь. По побудованим деталям можна автоматично побудувати креслення,

вказавши потрібний масштаб та формат аркушу. Для зручності проектування в програмному забезпеченні вбудовані всі необхідні інструменти, для перегляду інформації в області моделювання, збільшування та обертання деталі, створення перерізів у будь якому місці.

SolidWorks дозволяє імпортувати дані в інші програмні засоби САПР, що дозволяє проводити більш широкий аналіз у програмних засобах CAE.

Для початкового моделювання в середовищі було побудовано модель гіроскопу, яка пізніше виявилася дуже важкою для обрахунку і спрощена. Середовище Ansys також дозволяє створювати моделі у подібному до Солід інтерфейсі, але для роботи з комплексними збірками рекомендується застосовувати засоби, які проєктовані безпосередньо для моделювання твердих чи тонкостінних тіл.

Більшість тіл у Solidworks створюються з ескізу на площині (Рисунок. 2.1. 1). Для того, щоб створити один, необхідно вибрати площину, на якій він буде побудований. Початково пропонуються площини у відповідній системі координат XYZ.

Для побудови ескізу можна застосовувати прості фігури. Більшість з них можуть бути налаштовані, щоб обрати необхідну, треба натиснути на випадаюче меню.

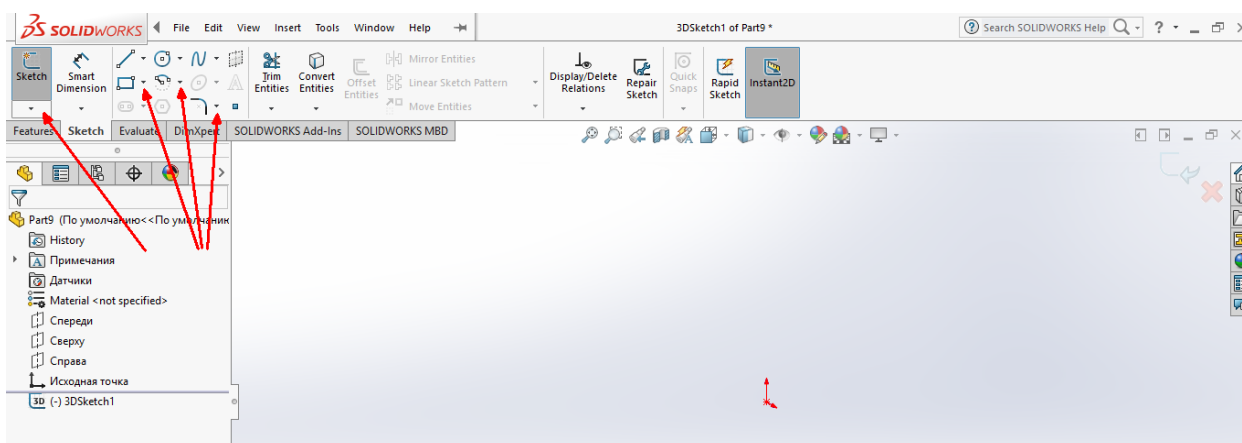


Рисунок 2. 1.1. – Створення ескізу на площині

Також є можливість створювати додаткові площини через три точки, через точку і пряму, або відштовхуючись від поверхонь/граней вже створених об'ємних тіл (Рисунок. 2. 1.2).

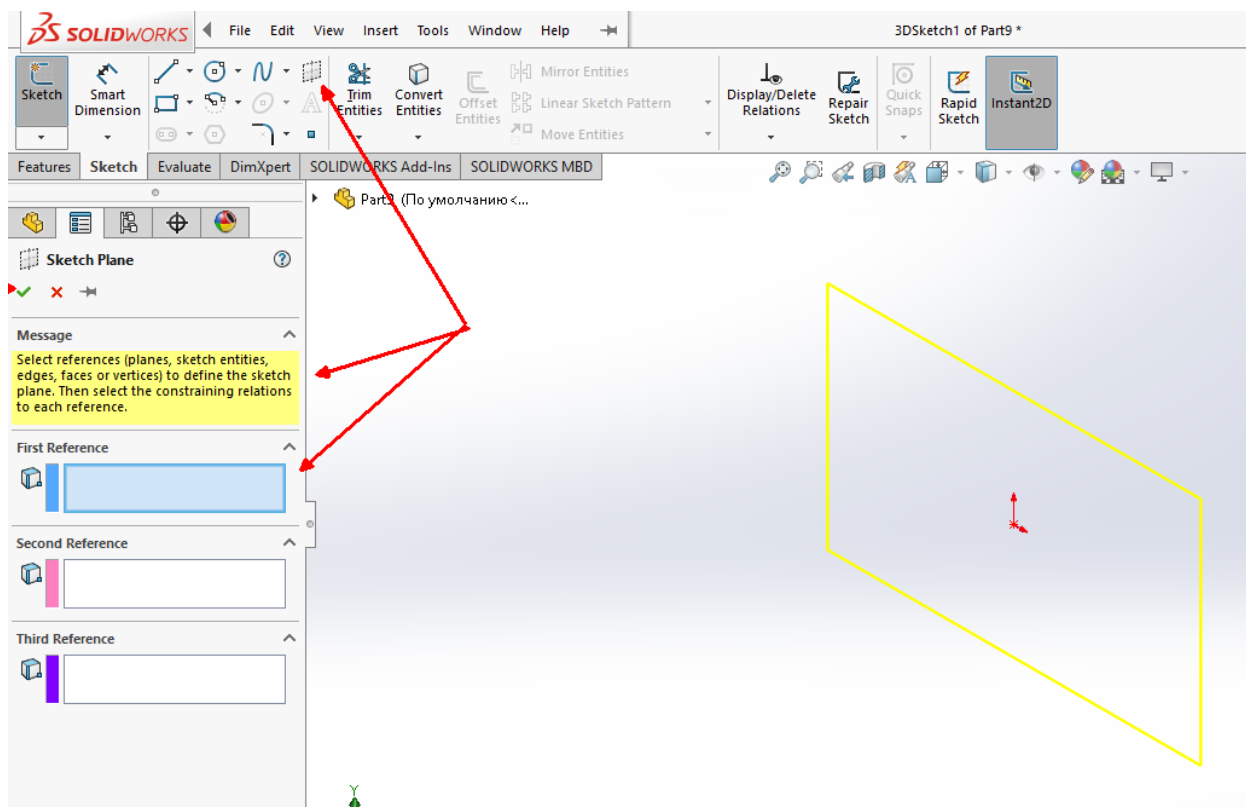


Рисунок 2. 1.2 – Створення додаткових площин

Для більш зручного подальшого моделювання Середовище має можливість швидкої конфігурації вже створених об'єктів і кривих через присвоєння їм змінних. Таким чином можна реалізовувати залежність розмірів одних фігур від

інших, щоб за необхідності новостворені автоматично перебудувалися при зміні всього одного-двох параметрів опорної фігури (рисунок. 2. 1.3)

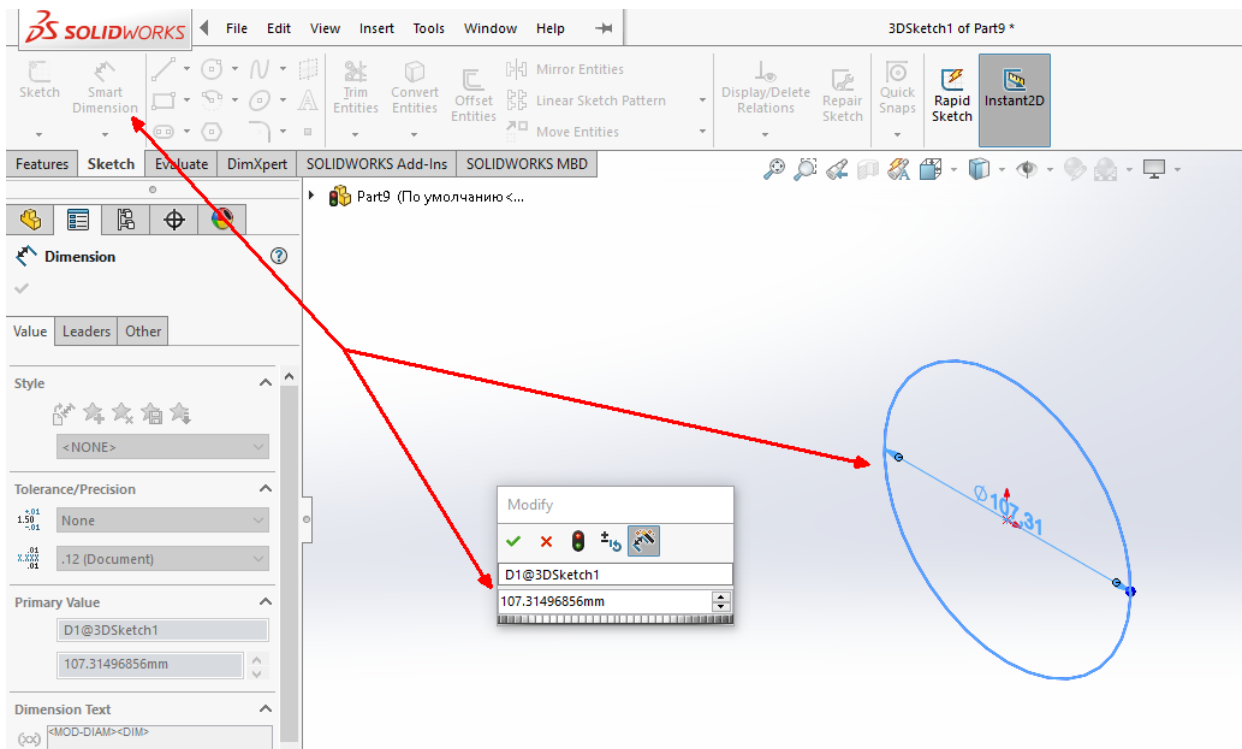


Рисунок 2. 1.3 – редагування розмірів фігур і присвоєння змінних

Після створення ескізу можна створити тверде тіло різними методами. Найпростіші: витягування бобишки та обертання навколо осі. Для кожного з них існують додаткові параметри.

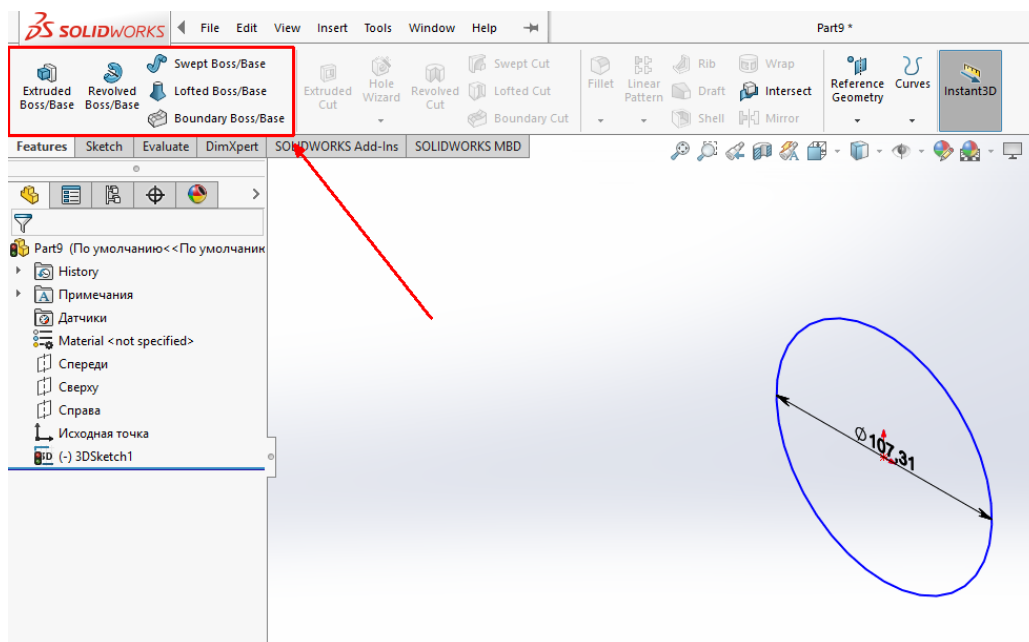


Рисунок 2. 1.4 – Створення твердого тіла з ескізу

Окремо можна створювати тверді тіла вздовж ескізу (кривої, наприклад) або через два і більше ескізів. Крім того, можна поєднувати тіла командою Boundary Boss/Base, створюючи тверду поверхню.

У твердих тілах можна виконувати отвори. Ті ж самі операції як з створенням твердого тіла, можна виконувати з отворами: через кілька ескізів, вздовж кривої, тощо.

Також в Середовищі є можливість створювати фаски і скруглення, копіювати ескізи вздовж кривих і відображати їх з копіюванням, створювати ребра жорсткості, вирізати частину матеріалу за ескізом з твердого тіла, щоб створити тонкостінний елемент; створювати ескіз і потім переносити його на площину об'ємної фігури, відображати об'ємні фігури.

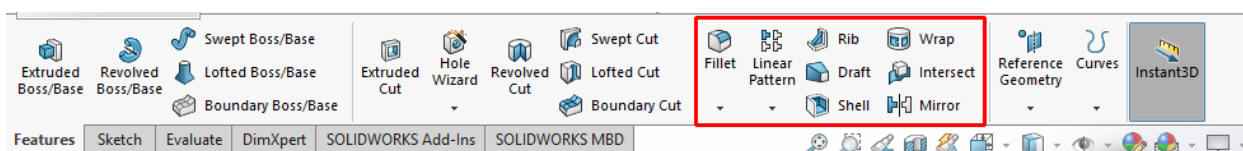
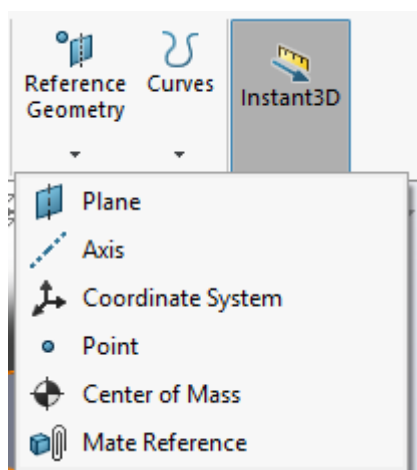
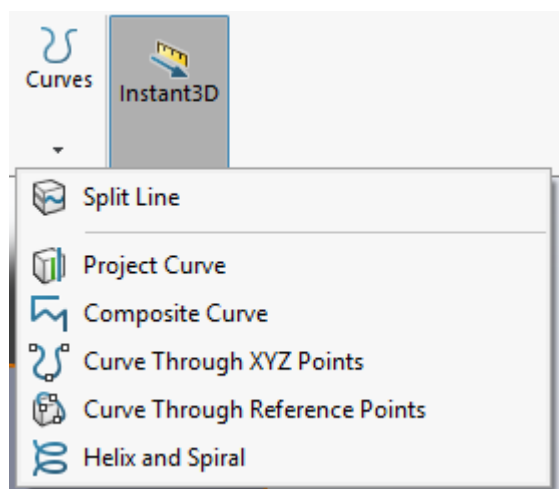


Рисунок 2. 1.5 – Допоміжні функції роботи з твердими тілами

Далі можна користуватися домоміжною геометрією (створювати площини, точки, вісі (рисунок 2. 1.6)) і створювати криві в просторі і на твердих тілах.



а)



б)

Рисунок 2. 1.6 – а) допоміжна геометрія, б) просторові криві

У вкладенні «Оцінка» (рисунок 2. 1.7) можна перевірити створені об'єкти на товщину, кривизну, завихреність, симулювати прикладення навантаження, визначати матеріали, з якого вони виконані і розраховувати масу.

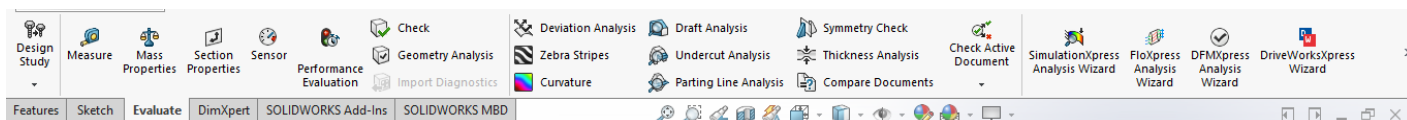


Рисунок 2. 1.7 – Оцінка моделей

У вкладенні «Додатки» (рисунок 2.1.8) до побудованих тіл можна застосовувати симуляції, створювати анімацію, піддавати моделі навантаженням. Але для таких цілей рекомендується застосовувати спеціалізовані середовища: Ansys, Abaqus та інші. Моделі з Середовища Солід імпортуються до них і можуть бути редаговані в них. Імпортувати до інших програм можна в розширеннях *.SLDPRT, *.dwg, *.stp, *.x_t

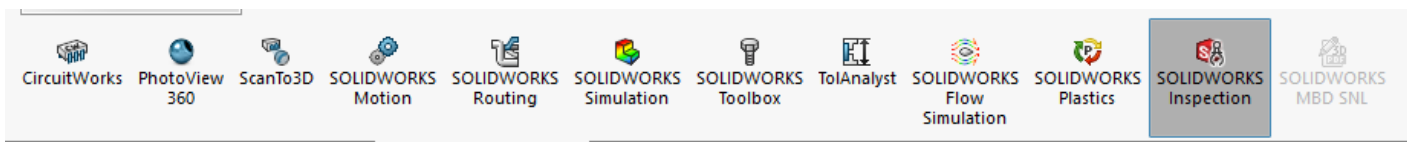


Рисунок 2. 1.8 – Меню моделювання і симуляції

Середовище Солід підтримує можливість створення збірок з декількох деталей, які також потім можна експортувати для подальшого моделювання.

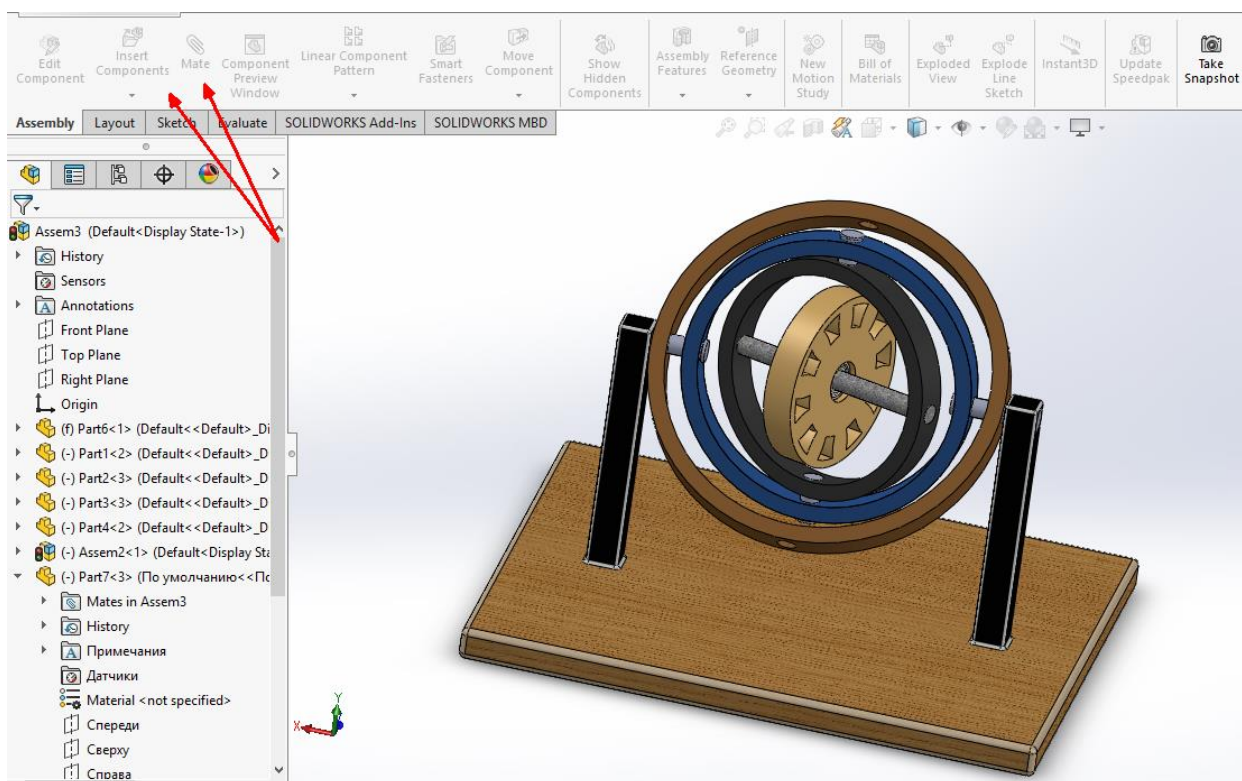


Рисунок 2.1.9 – Складання збірки

Найважливіші елементи збірки – зв'язки між деталями. Додаючи новий елемент до збірки, його необхідно обов'язково визначити, прив'язати до інших деталей. Зв'язки можуть бути дотичні і недотичні, на деякій відстані. За відсутності визначеності між елементами, неможливе подальше моделювання у інших середовищах. У середовищі збірки також можна вносити зміну у всі елементи, які в ній застосовані. Зміни будуть збережені у корневих файлах, або, за потреби, у окремий файл без прив'язки.

Для зручного користування і побудови креслень у Середовищі є можливість створювати розрізи в процесі моделювання.

2.2 Геометричне моделювання ротору гіроскопу

Для того щоб створити тривимірну деталь в SolidWorks потрібно скористатися командою «Новый документ» та обрати «Деталь», Рисунок 2. 2.1.

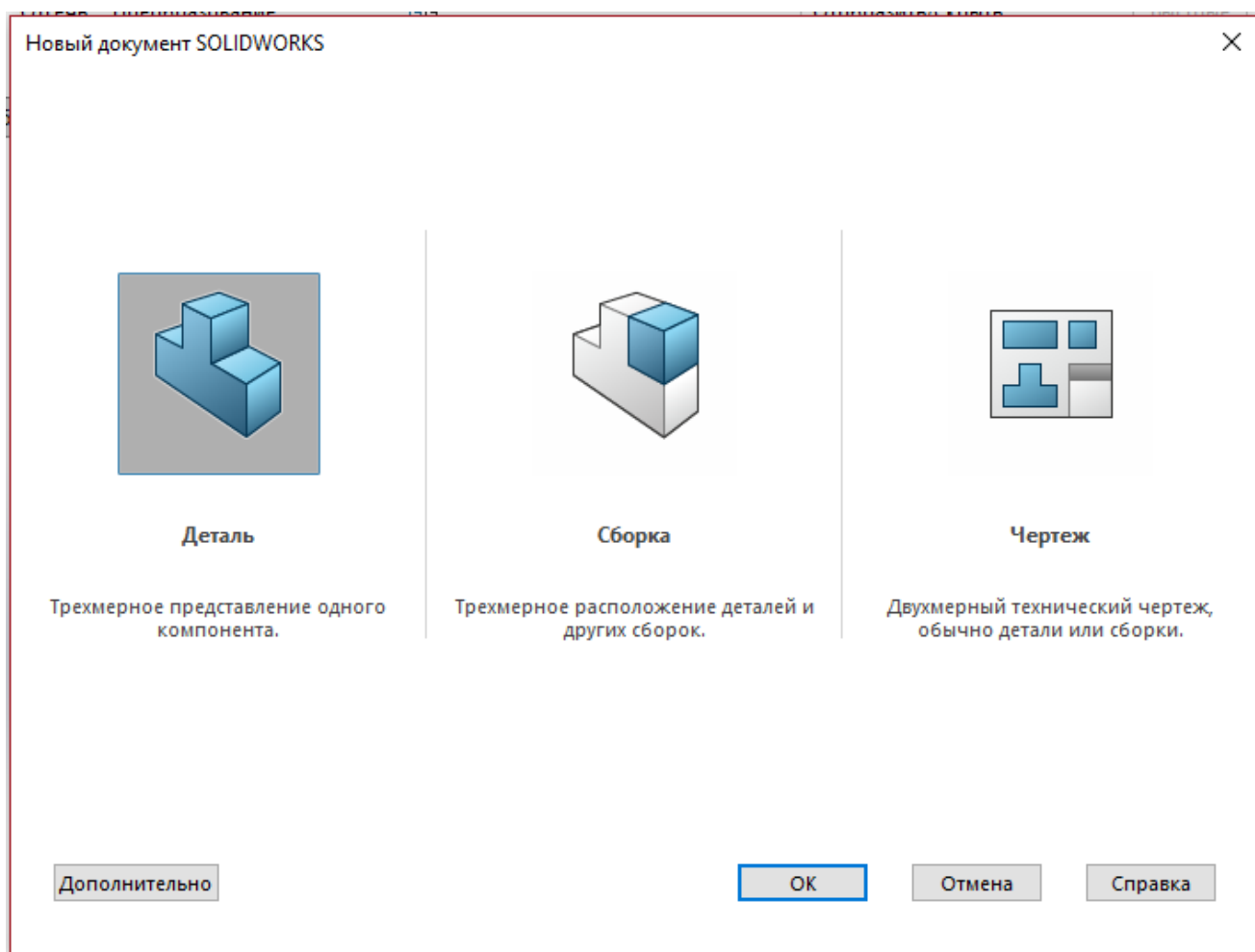


Рисунок 2.2.1. Створення нової деталі в SolidWorks

Щоб змодельовати ротор створимо ескіз та тривимірну модель його основи. Ескіз являє собою два концентричні кола діаметром 13 мм та 55 мм (Рисунок 2.2.2), тривимірна модель створюється на основі названого ескізу елементом «Вытянутая бобышка» на заданий розмір 10мм (Рисунок 2.2.3). Завершена тривимірна модель основи ротору показана на Рисунку 2.2.4. Таким чином ми отримали призму з основою у вигляді кола діаметром 55 мм, отвором діаметром 13 мм, та висотою 10 мм.

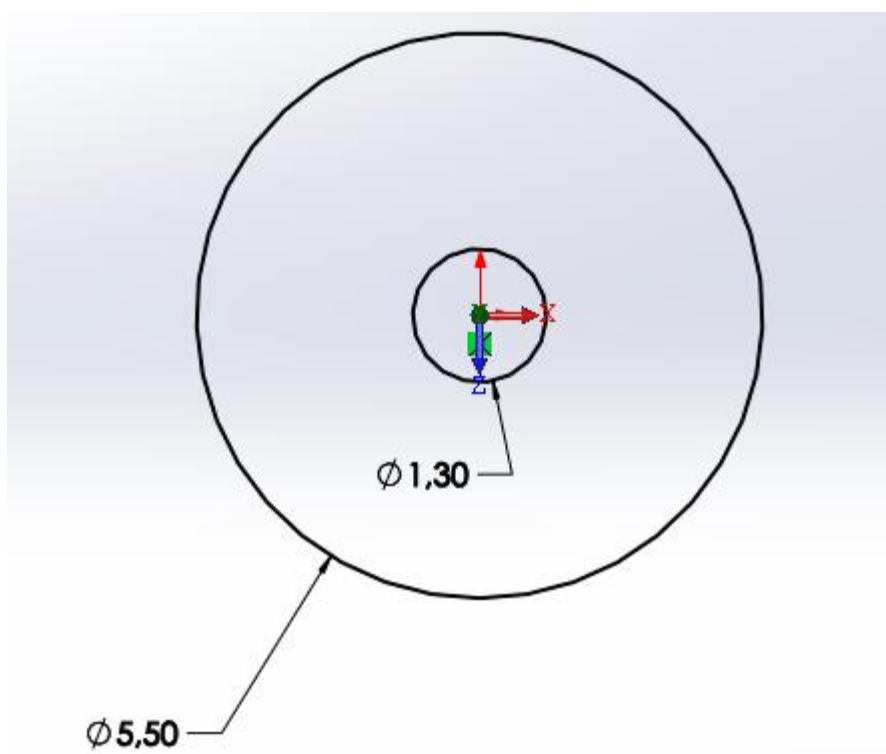


Рисунок 2. 2.2. Ескіз основи ротора.

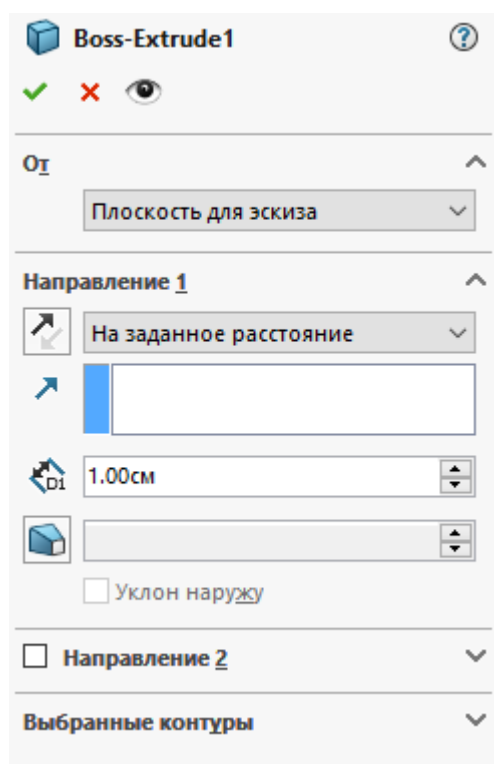


Рисунок 2. 2.3. Элемент «Вытянутая бобышка»

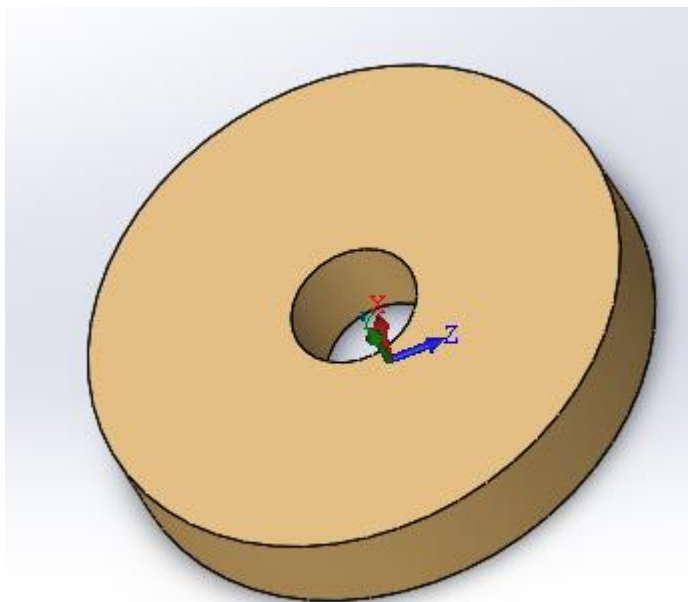


Рисунок 2.2.4. Трививірна модель основи ротору.

На одній з граней основи створимо ескіз кола з діаметром 30 мм. Рисунок 2.2.5. За допомогою елемента «Вытянутый вырез» (Рисунок 2.2.6) створюємо отвір глибиною 5 мм. Тривимірна модель після виконання даної операції представлена на Рисунку 2.2.7.

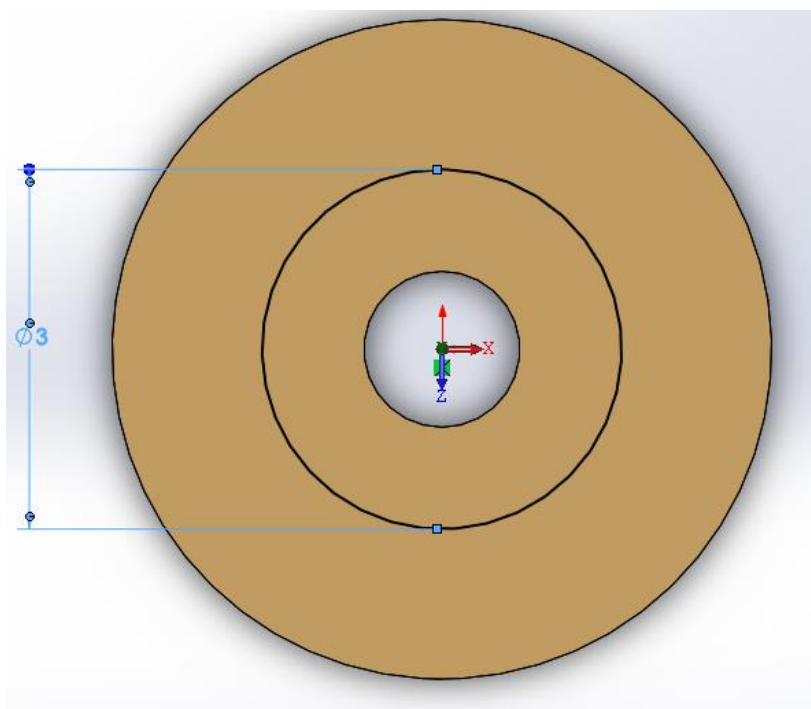


Рисунок 2.2.5. Ескіз для створення отвору.

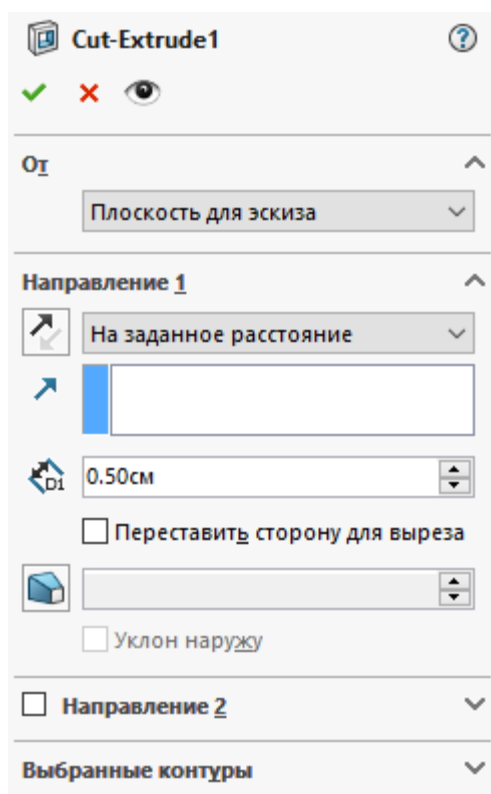


Рисунок 2.2.6. Элемент «Вытянутый вырез».

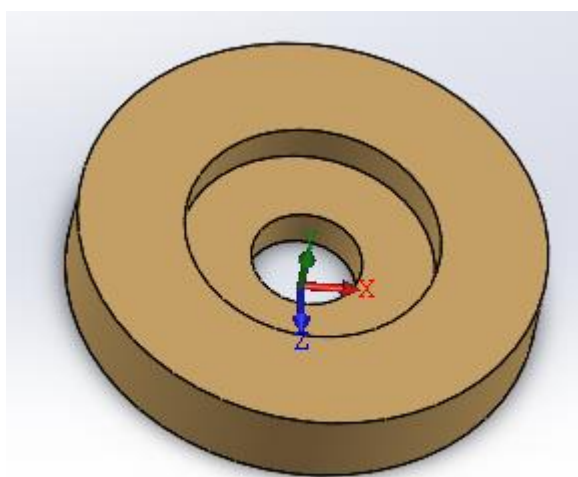


Рисунок 2.2.7. Тривимірна модель, результат виконання команди «Вытянутый вырез».

Створимо отвори для зменшення маси ротору, за допомогою кругового масиву на основі отвору на Рисунку 2.2.9. згідно з ескізом отвору на Рисунку 2.2.8. Для цього потрібно натиснути на меню «Вставка», «Массив/Зеркало», «Круговой массив», або на панелі інструментів «Круговой Массив». Після цього з'явиться

вікно налаштування кругового масиву (Рисунок 2.2.10), для початку треба задати вісь, потрібно створити додаткову геометрію у вигляді осі яка співпадає з віссю z , потім вказати кількість елементів, у даному випадку 10, та вказати рівномірний крок розподілу елементів. Результат геометричного моделювання ротору гіроскопу показаний на Рисунку 2.2.11.

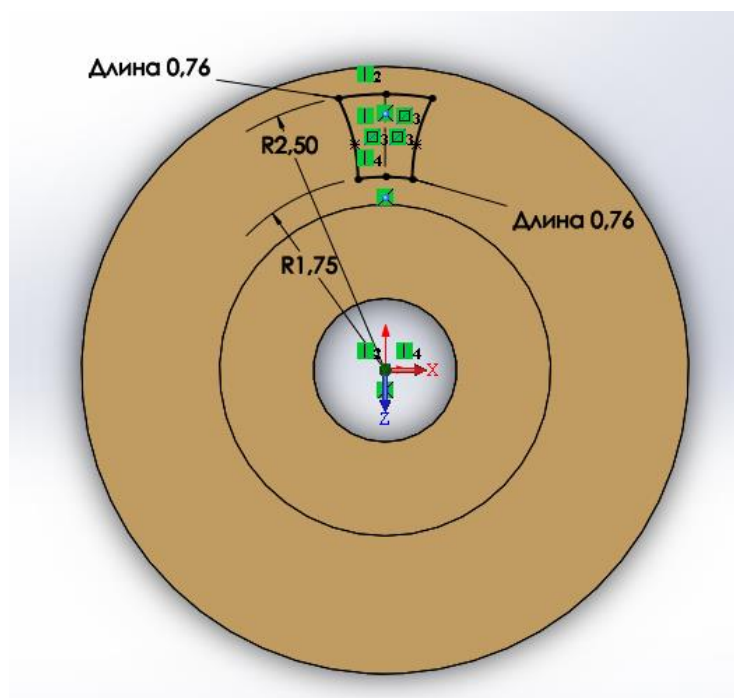


Рисунок 2.2.8. Ескіз для масиву отворів.

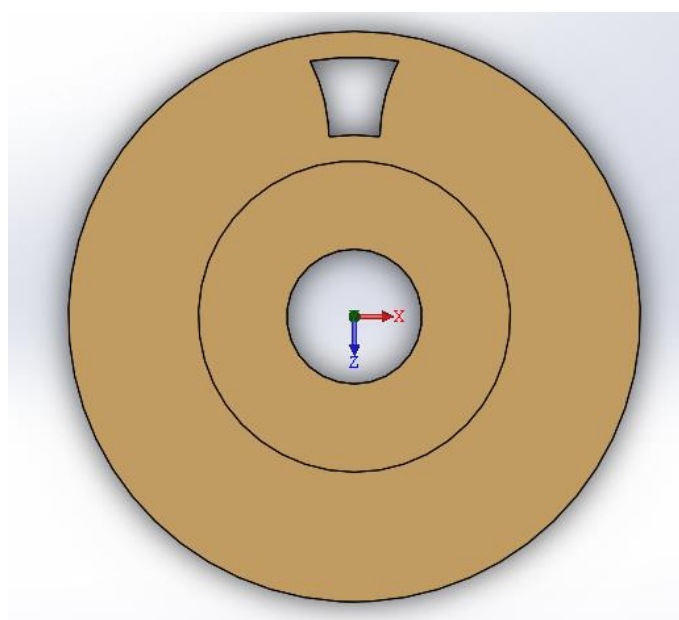


Рисунок 2.2.9. Основа для кругового масиву отворів

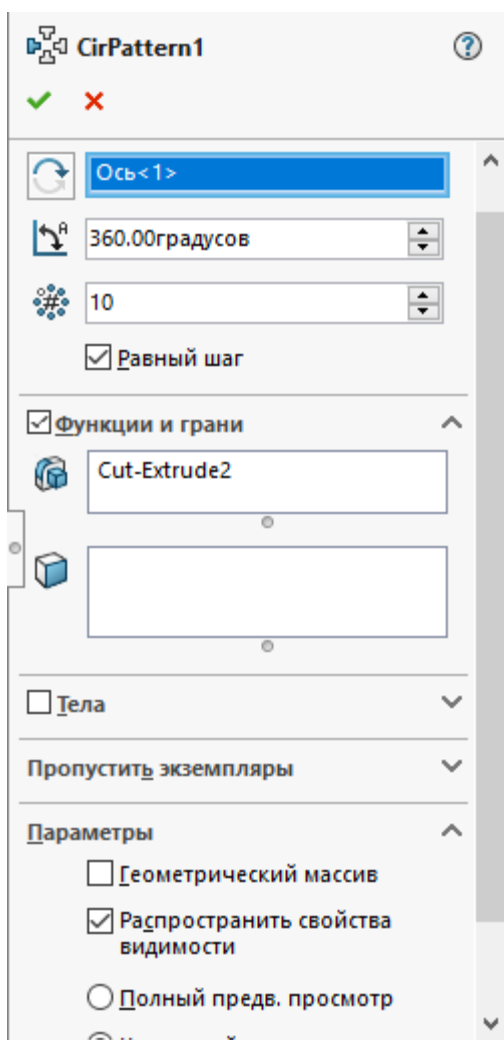


Рисунок 2.2.10. Налаштування кругового масиву елементів.

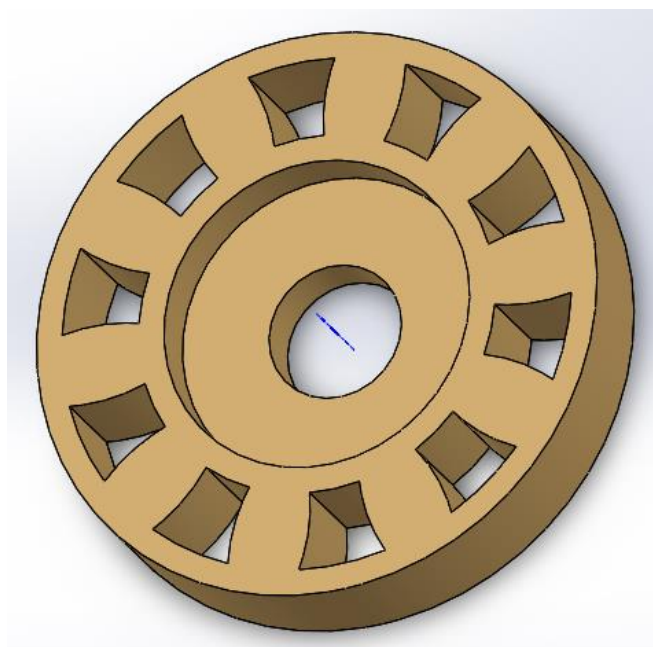


Рисунок 2.2.11. Завершена спрощена тривимірна модель ротору

2.3 Геометричне моделювання основи гіроскопу

Основа гіроскопу являє собою просту підставку для карданового підвісу. Отже, створимо ескіз призми 150*180 мм, Рисунок 2.3.1, та за допомогою елемента «Вытянутая бобышка» (Рисунок 2.3.2) створимо чотирикутну призму висотою 10 мм (Рисунок 2.3.3)

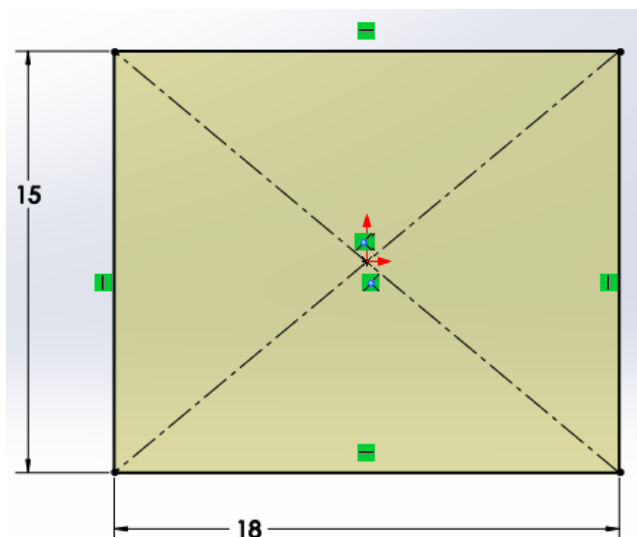


Рисунок 2.3.1. Ескіз основи призми

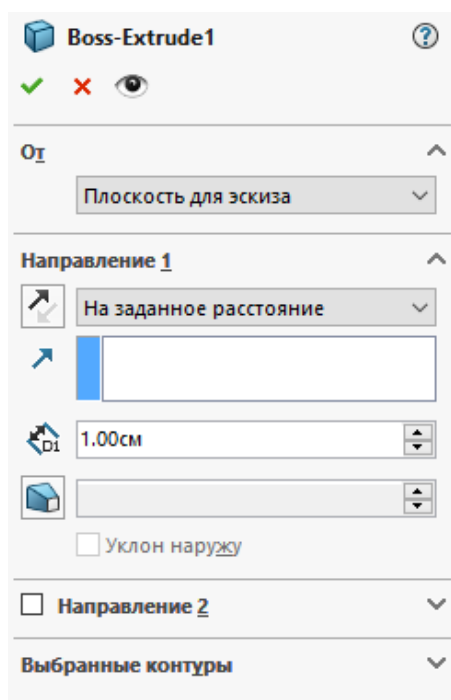


Рисунок 2.3.2. Елемент «Вытянутая бобышка» та його налаштування для створення тривимірної моделі призми

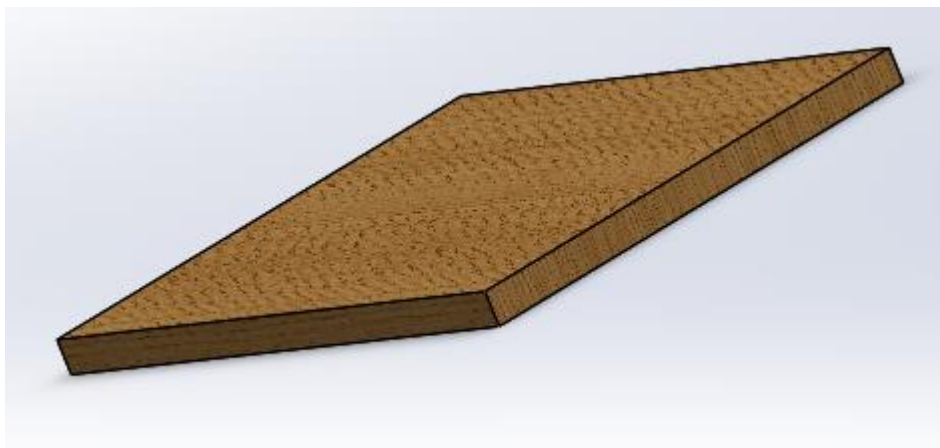


Рисунок 2.3.3 Тривимірна модель призми

На грані готової призми створюємо ескіз для двох стійок Рисунок 2.3.4, які являють собою дві чотирикутні призми, за допомогою елемента «Витягнута бобышка» витягуємо ескіз на 80 мм, тривимірна модель результату показана на Рисунку 2.3.5.

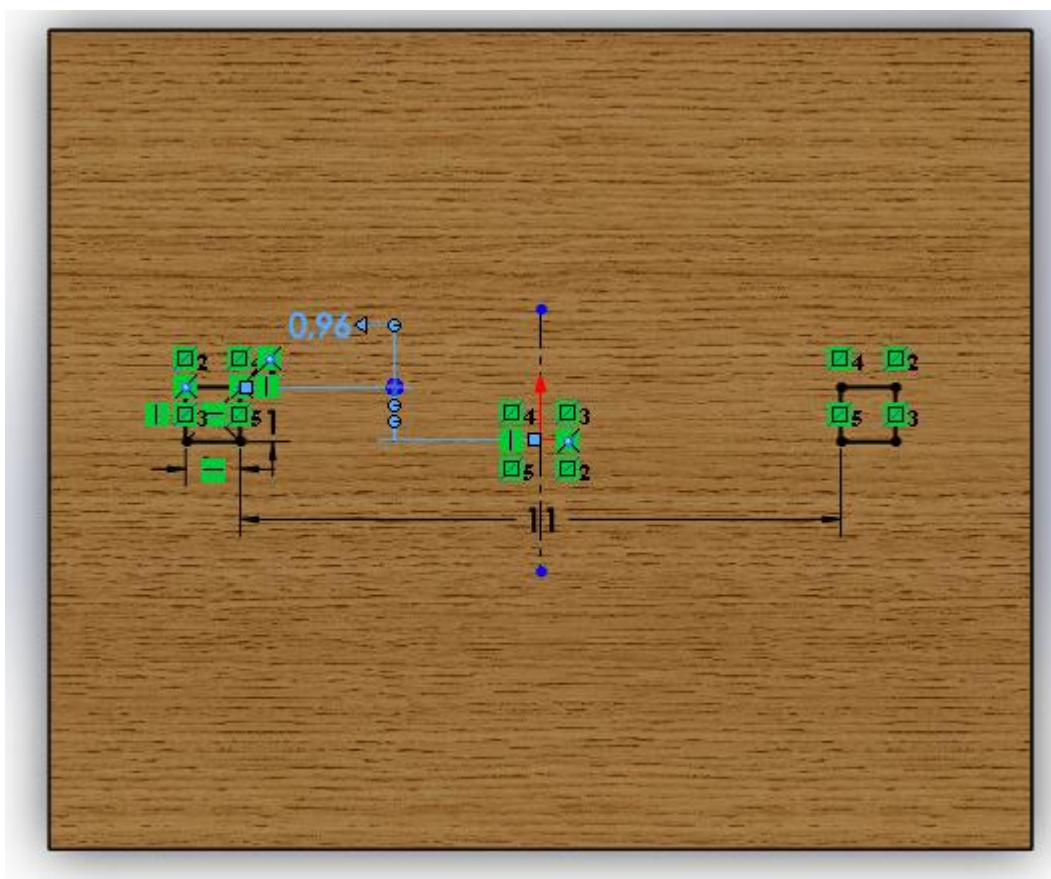


Рисунок 2.3.4. Ескіз для стійок

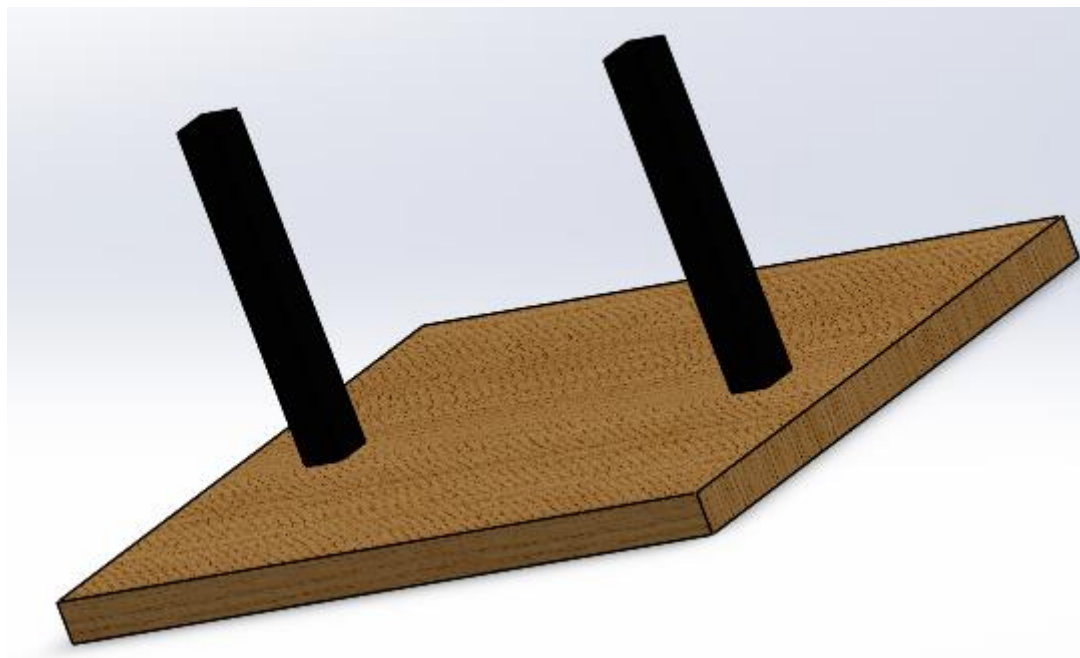


Рисунок 2.3.5 Тривимірна модель основи

Створимо отвори для закріплення чутливого елемента в кардановому підвісі, ескіз отвору показаний на Рисунку 2.3.6, та являє собою коло діаметром 5 мм. За допомогою елемента «Витянутий виріз» створюємо 2 отвори, Рисунок 2.3.7

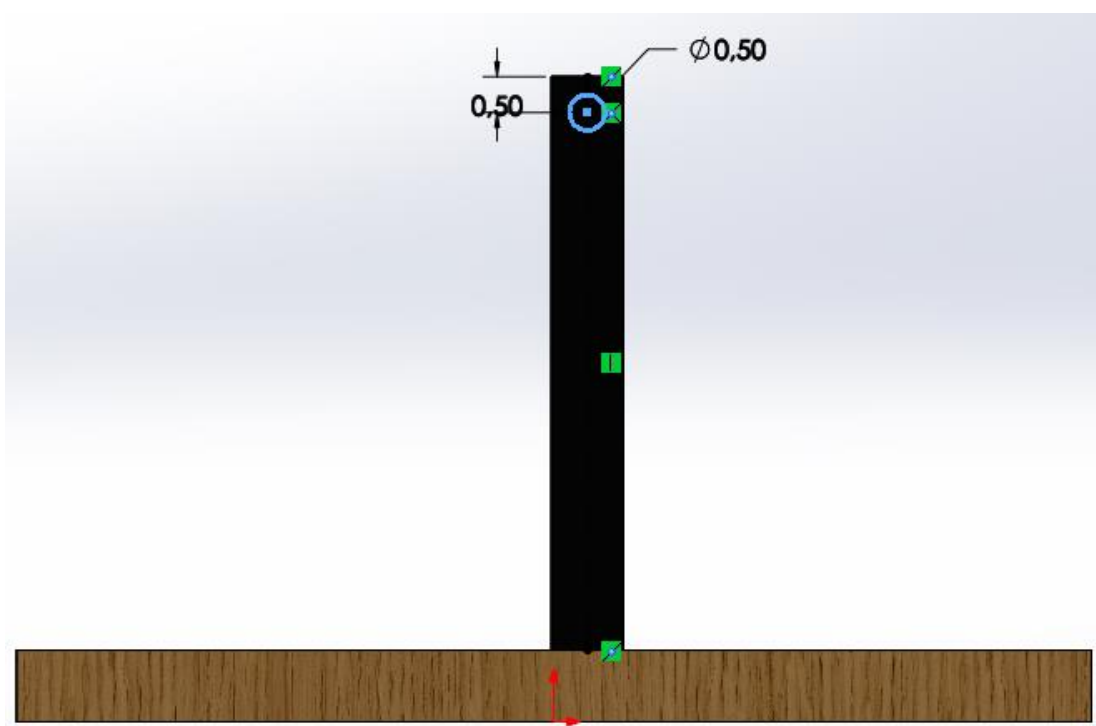


Рисунок 2.3.6. Ескіз отвору для закріплення

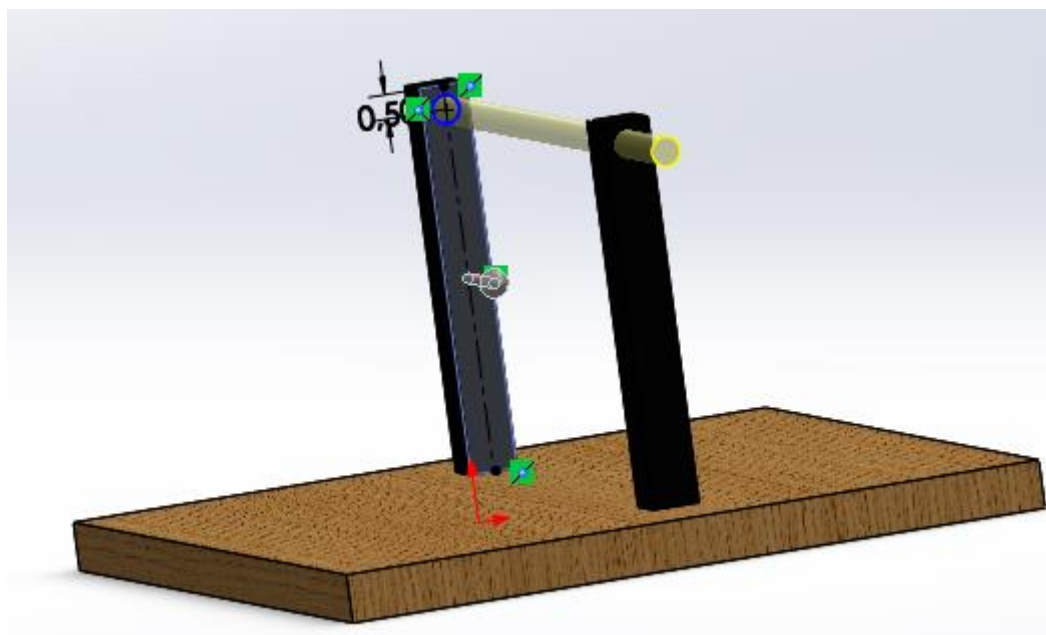


Рисунок 2.3.7. Команда «Вытянутый вырез» з налаштуванням «насквозь»

Для завершення формування тривимірної моделі основи зробимо скруглення, для цього на панелі інструментів виберемо «Скругление», далі потрібно обрати грані які потрібно скруглити, вибрати профіль та радіус скруглення Рисунок 2.3.8, Рисунок 2.3.9. Готова тривимірна модель основи представлена на Рисунку 2.3.10.

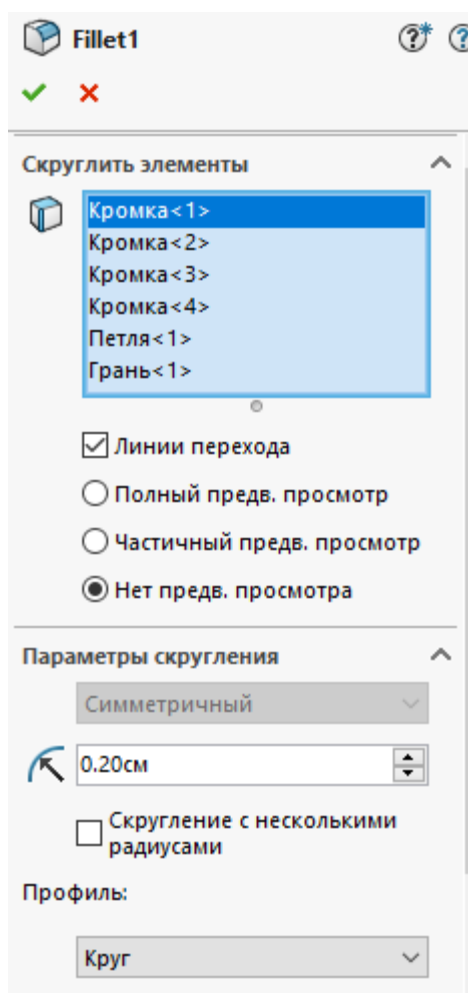


Рисунок 2.3.8. Налаштування команди «Скругление»

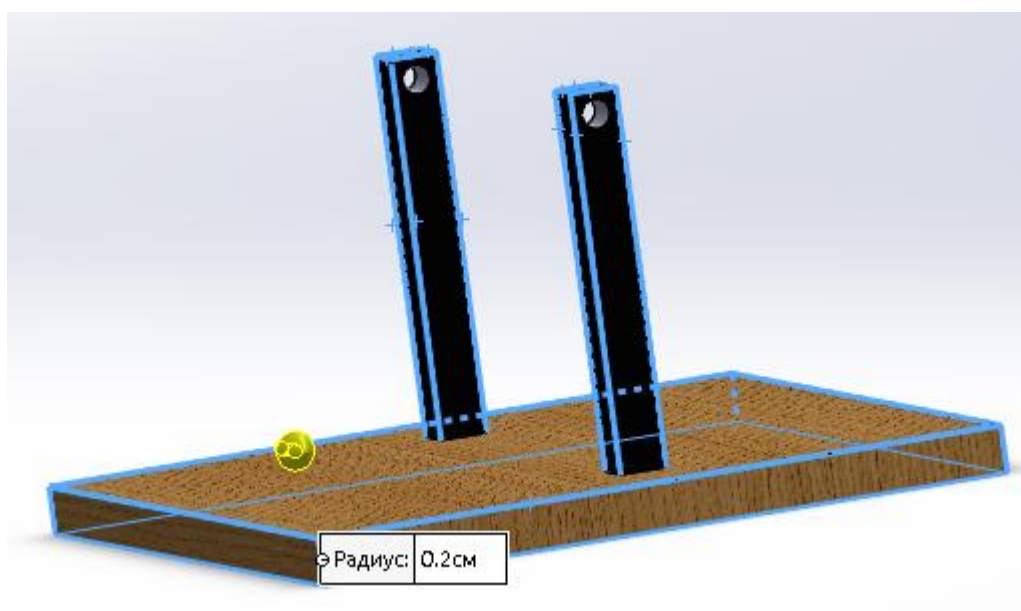


Рисунок 2.3.9. Вибрані грані для скруглення

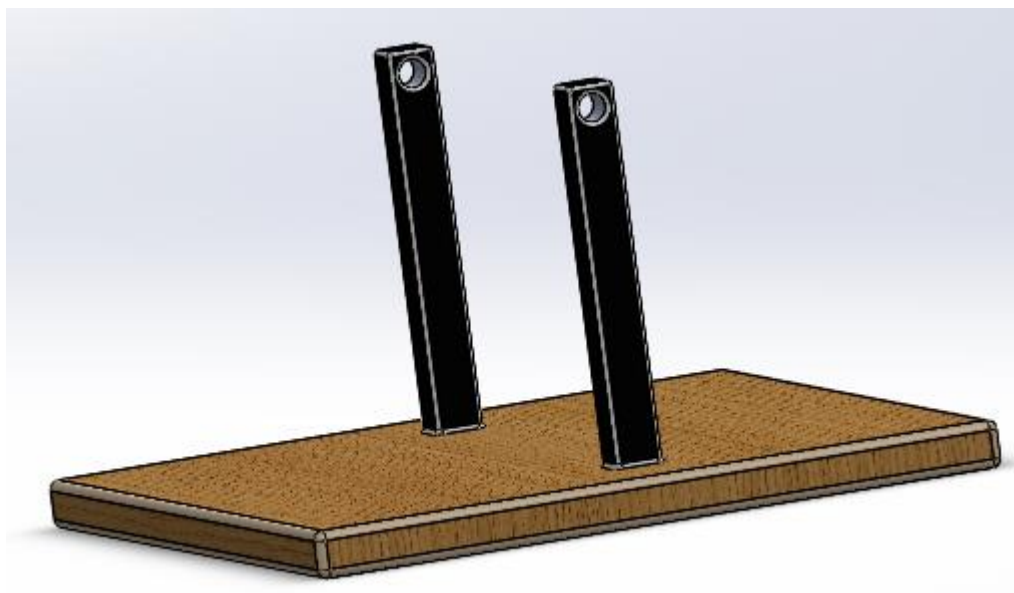


Рисунок 2.3.10. Тривимірна модель основи.

Розділ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Аналіз деформацій

Для динамічного аналізу складних пристроїв зручно застосовувати середу для моделювання ANSYS, яка має широкий вибір налаштувань, описані вище. Проведення динамічного аналізу запропоновано розглянути на прикладі гіроскопу.

Середа ANSYS має вбудовану платформу для проектування простих об'єктів, наприклад, для статичного аналізу, як пластини і зачеплення. Однак для побудови складних механізмів рекомендується застосовувати сторонні засоби, а в ANSYS імпортувати геометрію з серед проектування, наприклад, Solidworks.

Так для реалізації динамічного аналізу була побудована модель (рис. 2.4.1). Усі деталі гіроскопу рухомі, тому в зачепленнях застосовуються підшипники, однак аналітичне моделювання динамічних процесів енерго- і часозатратне, тому в цілях спрощення і пришвидшення моделювання підшипники можна замінити на вали (штифти) з обов'язковим вказанням коефіцієнтів тертя у зачепленнях.

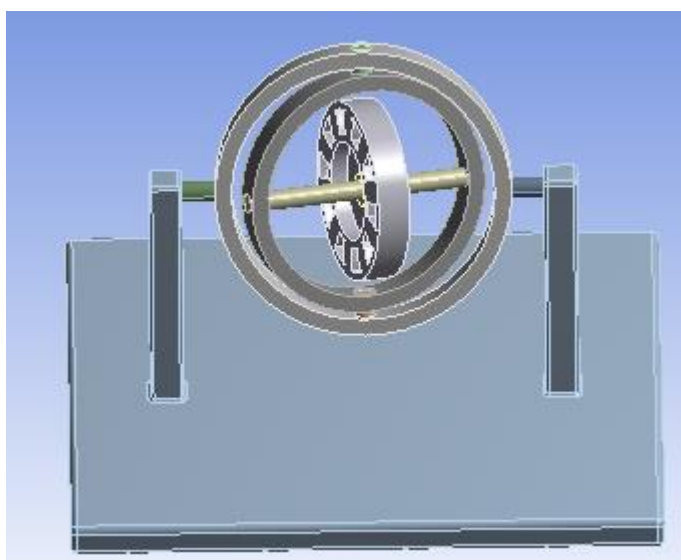


Рисунок 2.4.1 – Модель гіроскопу

3.1.1 Встановлення з'єднань

Щоб провести імітаційне моделювання, будемо використовувати програмний пакет ANSYS Workbench. Середовище ANSYS має вбудовану платформу для проектування простих об'єктів, наприклад, для статичного аналізу, як пластини і зачеплення. Однак для побудови складних механізмів рекомендується застосовувати сторонні засоби, а в ANSYS імпортувати геометрію з середовищ проектування, наприклад, Solidworks.

Для реалізації імітаційного моделювання була побудована модель (рис. 3.1.1). Усі деталі гіроскопу рухомі, тому в зачепленнях застосовуються підшипники, однак аналітичне моделювання динамічних процесів енерго- і часозатратне, тому в цілях спрощення і пришвидшення моделювання підшипники можна замінити на вали (штифти) з обов'язковим вказанням коефіцієнтів тертя у зачепленнях.

ANSYS має досить простий робочий графічний інтерфейс (рис. 3.1.1)

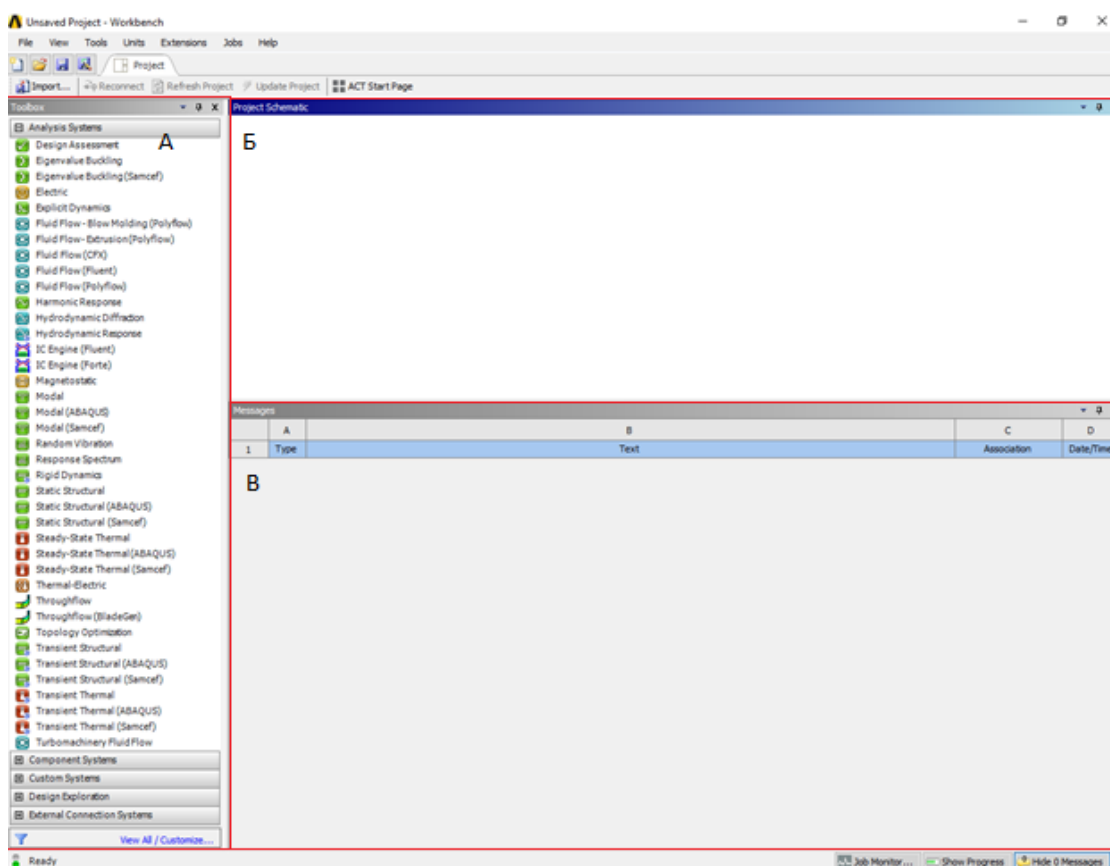


Рисунок 3.1.1 – Робоча область управління проектом.

А – Інструментарій (Toolbox); Б – Схема проекту (Project Schematic);

В – Список властивостей (Properties of Schematic).

Для того щоб створити проект в ANSYS достатньо перетягнути з інструментарію потрібний елемент в схему проекту, встановити необхідні зв'язки та налаштувати в списку властивостей елементів самі інструменти. Для моделювання гіроскопу будемо використовувати модуль Transient Structural (рис.3.4.2).

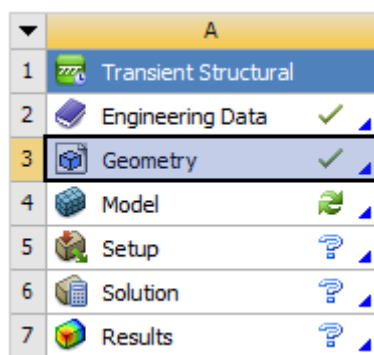


Рисунок 3.1.2 – Інструментарій для модулю Transient Structural

Аналіз перехідних процесів (Transient Structural), за визначенням, включає навантаження, які є функцією часу. У застосуванні Mechanical можна виконувати перехідний аналіз або на гнучкій структурі, або на жорсткій збірці. Для гнучкої структури, Механічна програма може використовувати ANSYS Механічний APDL, Samcef або ABAQUS вирішувач для вирішення перехідного структурного аналізу.

Перехідний структурний аналіз може бути лінійним або нелінійним. Допускаються всі типи нелінійностей - великі деформації, пластичність, контакт, гіпереластичність тощо. ANSYS Workbench пропонує додатковий метод рішення режиму суперпозиції для виконання лінійного перехідного структурного аналізу. У методі суперпозиції режиму перехідна реакція на заданий стан навантаження отримується шляхом обчислення необхідних лінійних комбінацій власних векторів, отриманих в модальному аналізі. Докладніші відомості див. У розділі Перехідний структурний аналіз з використанням системи пов'язаного модельного аналізу. Метод суперпозиції режиму недоступний для вирішувача Samcef або ABAQUS.

Тимчасовий динамічний аналіз важчий, ніж статичний аналіз, оскільки він зазвичай вимагає більшої кількості ресурсів комп'ютера та більшої кількості ресурсів, з точки зору часу “інженерії”. Ви можете заощадити значну кількість цих ресурсів, виконавши попередню роботу, щоб зрозуміти фізику проблеми. Наприклад, ви можете:

- зрозуміти, як нелінійності (якщо ви їх включаєте) впливають на реакцію структури, роблячи перший статичний аналіз. У деяких випадках нелінійності не потрібно включати в динамічний аналіз. Включення нелінійних ефектів може бути дорогим з точки зору часу рішення.
- Зрозуміти динаміку проблеми. Виконуючи модальний аналіз, який обчислює власні частоти і форми мод, ви можете дізнатися, як структура реагує, коли ці режими збуджуються. Природні частоти також корисні для розрахунку правильного етапу часу інтеграції.

- Спочатку проаналізуйте більш просту модель. Модель тільки ротору гіроскопа може забезпечити гарне розуміння проблеми при мінімальних витратах. Ця більш проста модель може бути все, що потрібно для визначення динамічної відповіді структури

Наступним кроком буде імпортування геометрії з середовища Solid works

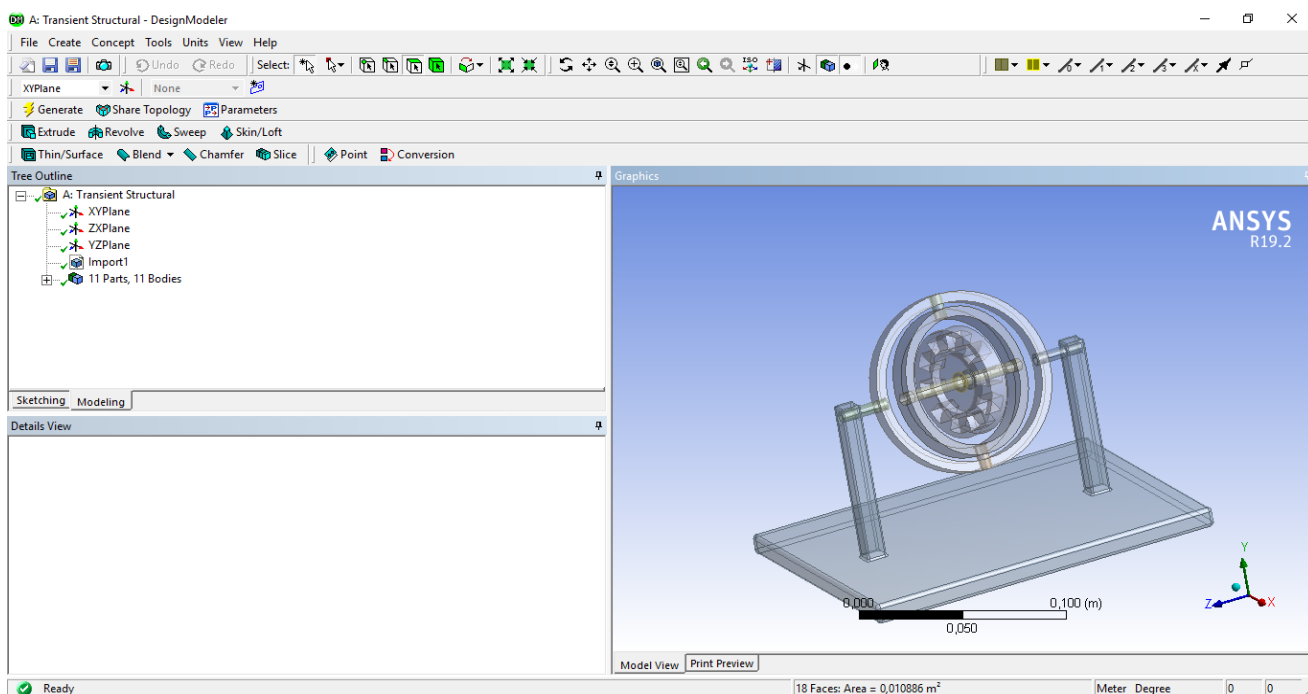


Рисунок 3.1.3 – Імпортована модель з середовища Solid Works

Після успішного імпортування геометричної моделі (рис. 3.1.3) потрібно відкрити вікно редагування імітаційної моделі (вкладка 4.Model, рис. 3.1.2), задати сітку дискретизації та згенерувати її (рис. 3.1.5)

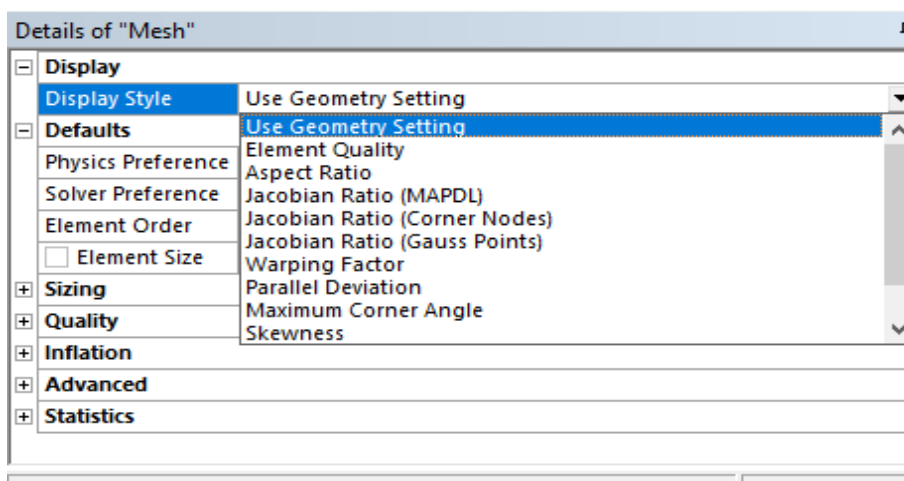


Рисунок 3.1.4 – Налаштування сітки дискретизації

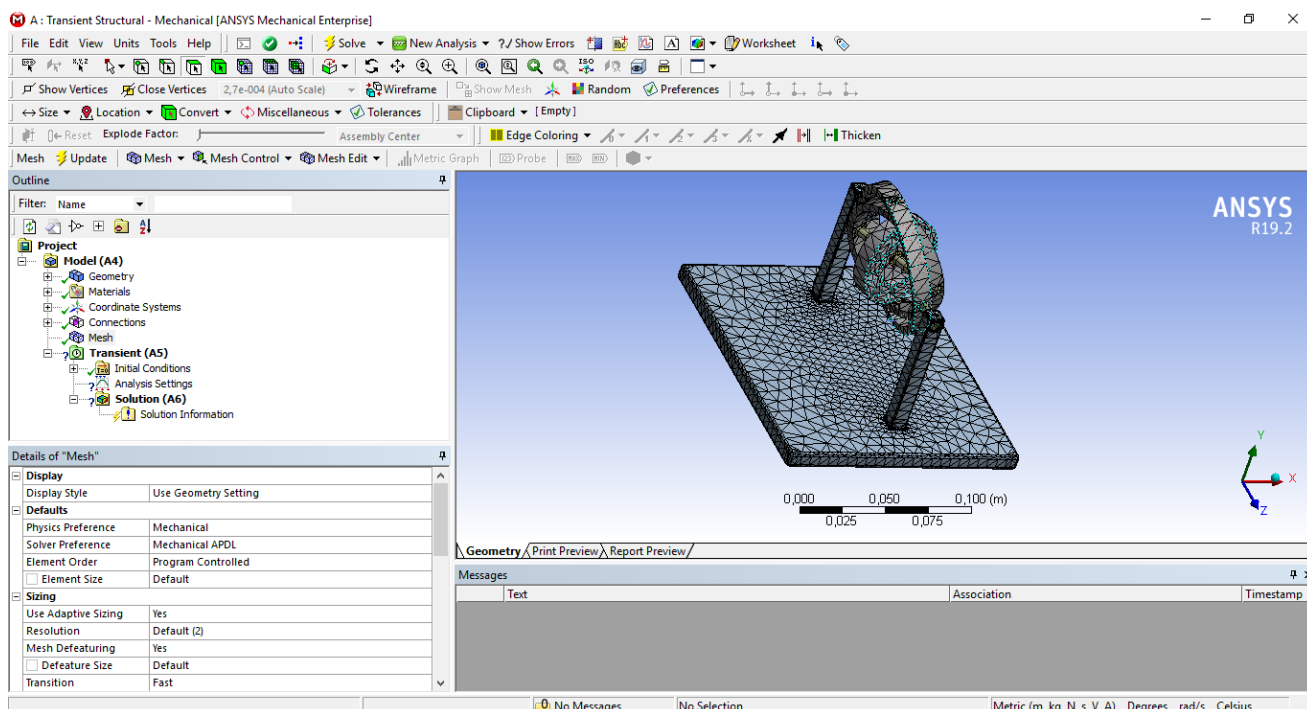


Рисунок 3.1.5 – результат генерування сітки дискретизації

Таким чином підготовка до аналізу методом скінченних елементів завершена.

Щоб провести імітаційне моделювання складної геометрії потрібно встановити правильні зв'язки між її частинами, зазвичай при автоматичному генеруванні такі зв'язки не досить точно передають фізичні властивості моделі та можуть спровокувати помилки роботи вирішувача, тому потрібно видалити теку Contacts в вкладці Connections (рис. 3.1.6)

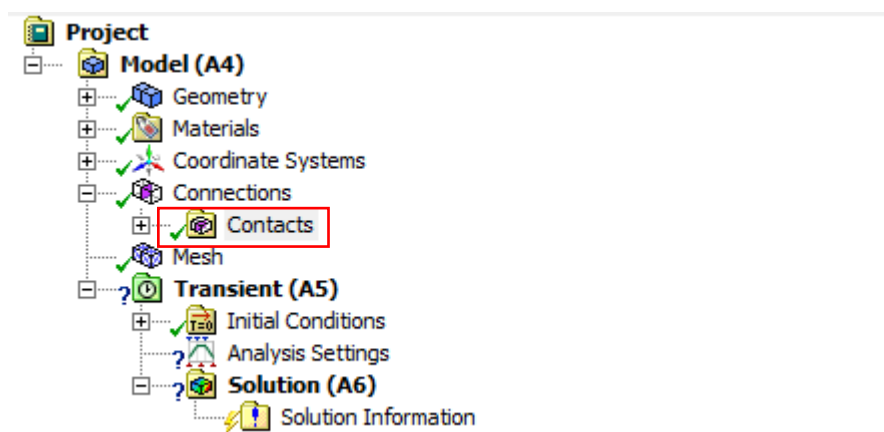


Рисунок 3.1.6 – видалення автоматично згенерованих зв'язків

Після успішного видалення зв'язків, потрібно встановити їх вручну. На геометричній моделі ротор гіроскопа був встановлений на підшипник, але це досить складний елемент для моделювання і зазвичай його замінюють зв'язками між елементами та штифтовими з'єднаннями. Для цього зробимо вкладку Connections активною та додамо зв'язок типу Join Body-Body Revolute між самим тілом ротора та штифта на якому він знаходиться (рис. 3.1.7).

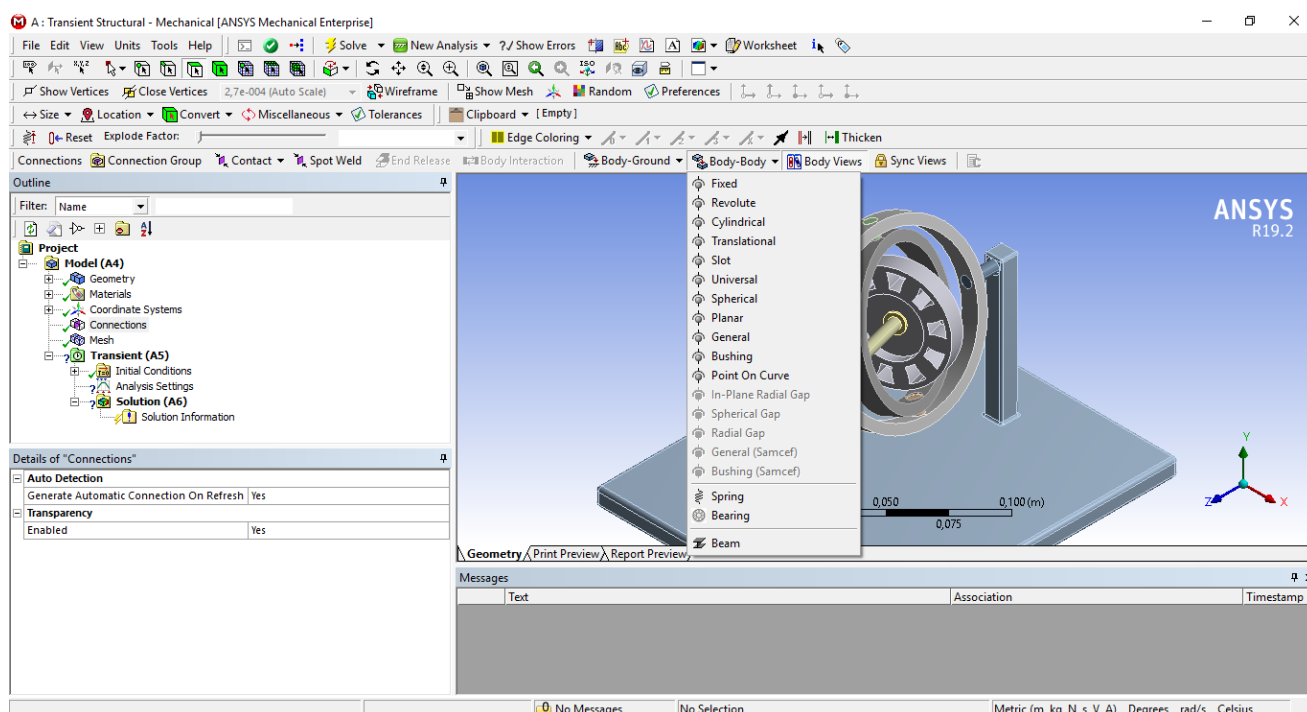


Рисунок 3.1.7 - Join Body-Body Revolute

У режимі редагування данного з'єднання потрібно вибрати потрібні площини геометрії між якою встановлюється з'єднання (рис 3.1.8). Revolute – тип з'єднання при якому враховується тертя та можливе обертання, тому потрібно задати вісь для обертання, зазвичай за замовчування використовується вісь Z, тому сама її потрібно встановити так щоб вона співпадала з вектором обертання ротору (рис. 3.1.9)

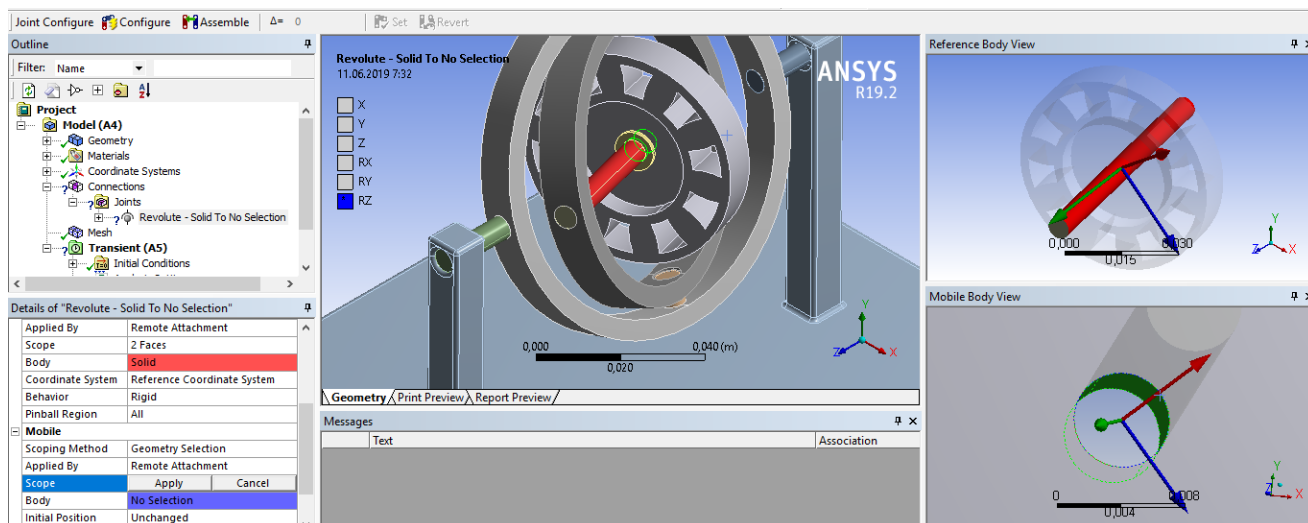


Рисунок 3.1.8 – вибір геометрії між якими проводиться обертання

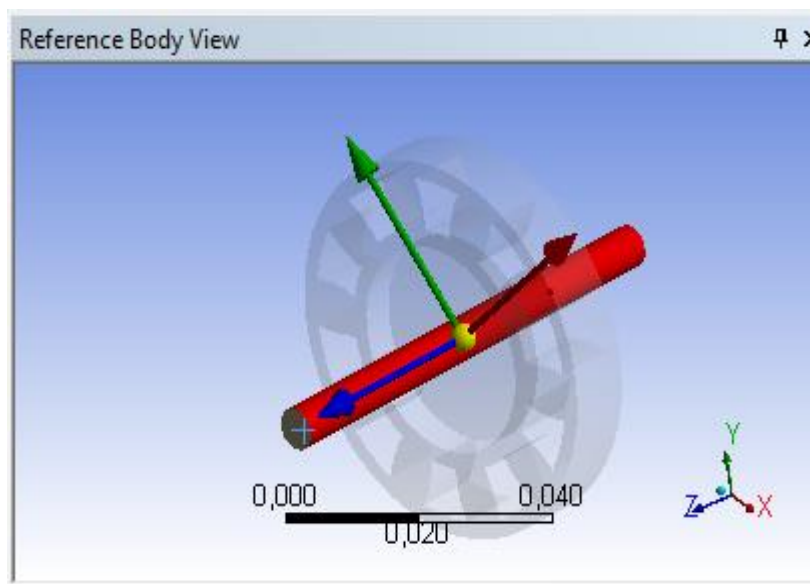


Рисунок 3.1.9 - Виставлення осі Z для обертання ротора

Для того щоб ротор не «ковзав» по всій поверхні штифта було додано додаткову геометрію у вигляді двох кілець таким чином що вони повинні буди зафіксованими зі штифтом та не зафіксованими з ротором. Було використано з'єднання Join Body-Body Revolute між відповідною поверхнею ротору та

поверхнею кільця (рис 3.1.10 а, б), а між кільцями та штифтом Join Body-Body Fixed (рис 3.1.11)

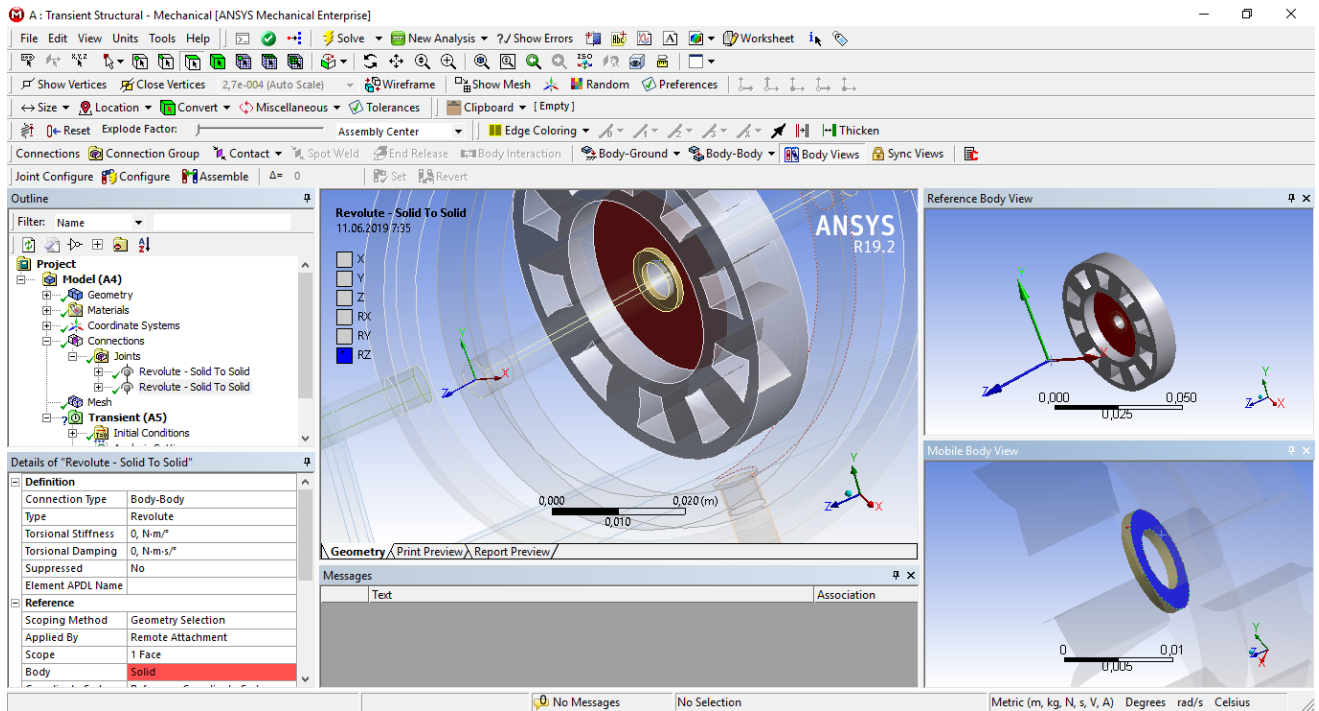


Рисунок 3.1.10 а) - Join Body-Body Revolute між ротором та кільцем

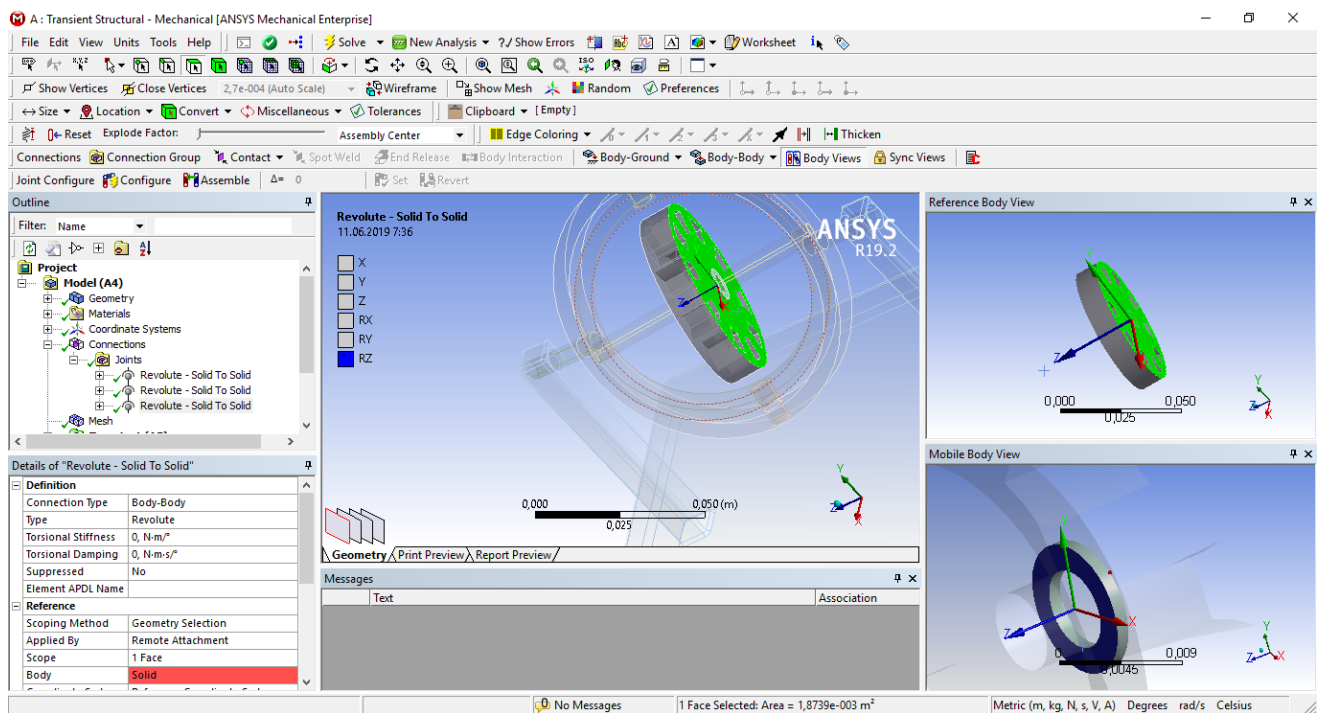


Рисунок 3.1.10 б) - Join Body-Body Revolute між ротором та кільцем

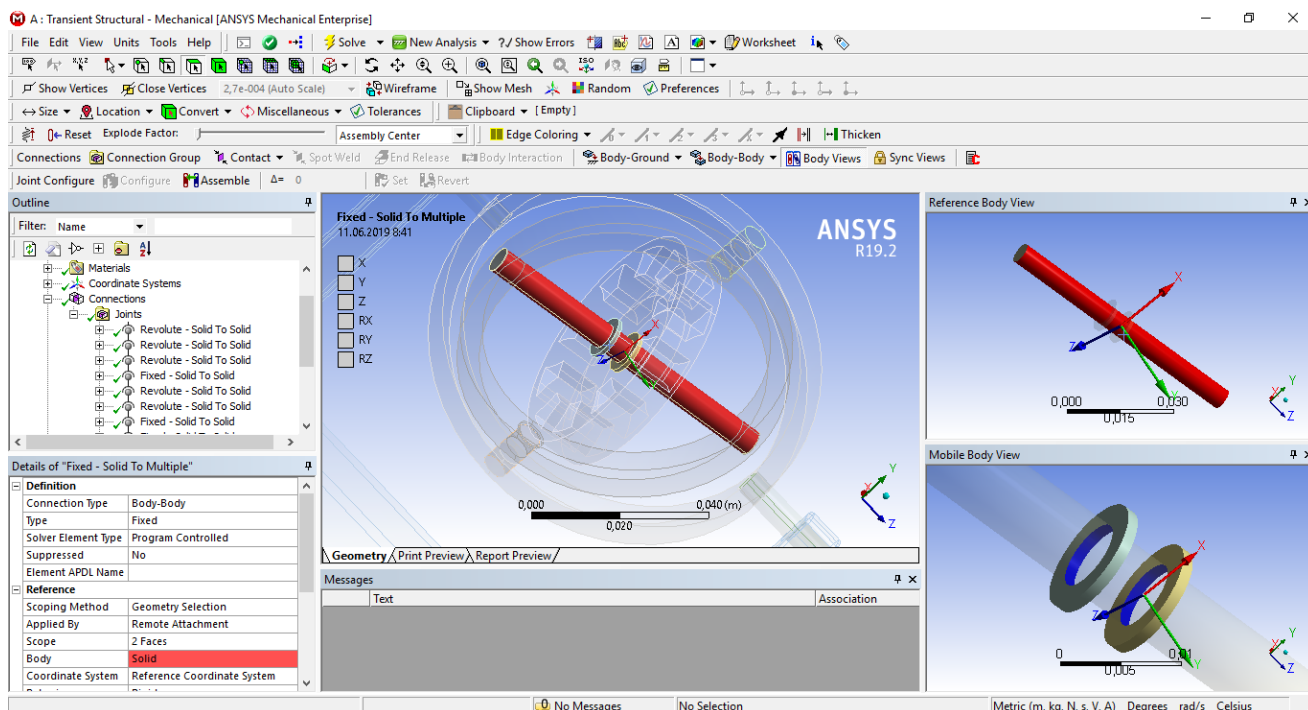


Рисунок 3.1.11 - Join Body-Body Fixed між штифтом та кільцями

Дані зв'язки та додаткові геометричні елементи допоможуть зімітувати роботу підшипника на якому встановлений гіроскоп. Далі за допомогою Join Body-Body Fixed з'єднаємо штифт на якому встановлений ротор з внутрішньою рамкою гіроскопа (рис. 3.1.12)

Щоб зімітувати другу ступінь свободи гіроскопа потрібно забезпечити обертання внутрішньої рамки разом з ротором узовнішній рамці. Внутрішня рамка з'єднання з зовнішньою штифтами, тому за допомогою зв'язків потрібно роботу підшипників знову. Для цього між поверхнею отворів для штифтів внутрішньої рамки та відповідними поверхнями штифтів створимо зв'язок типу Join Body-Body Revolute (рис 3.1.13 – рис 3.1.14), а між отворами в зовнішній рамці та поверхнями цих же штифтів з'єднання Join Body-Body Fixed (рис 3.1.15 – рис. 3.1.16). Таким чином була зімітована друга ступінь свободи гіроскопу. Для тикого типу з'єднання дуже важливо правильно встановити осі по яким будуть встановлені вектори обертання, тому що при будь-якій помилці в геометрії

виникає помилка в вирішувачі, а при великій кількості зв'язків досить легко запутатись.

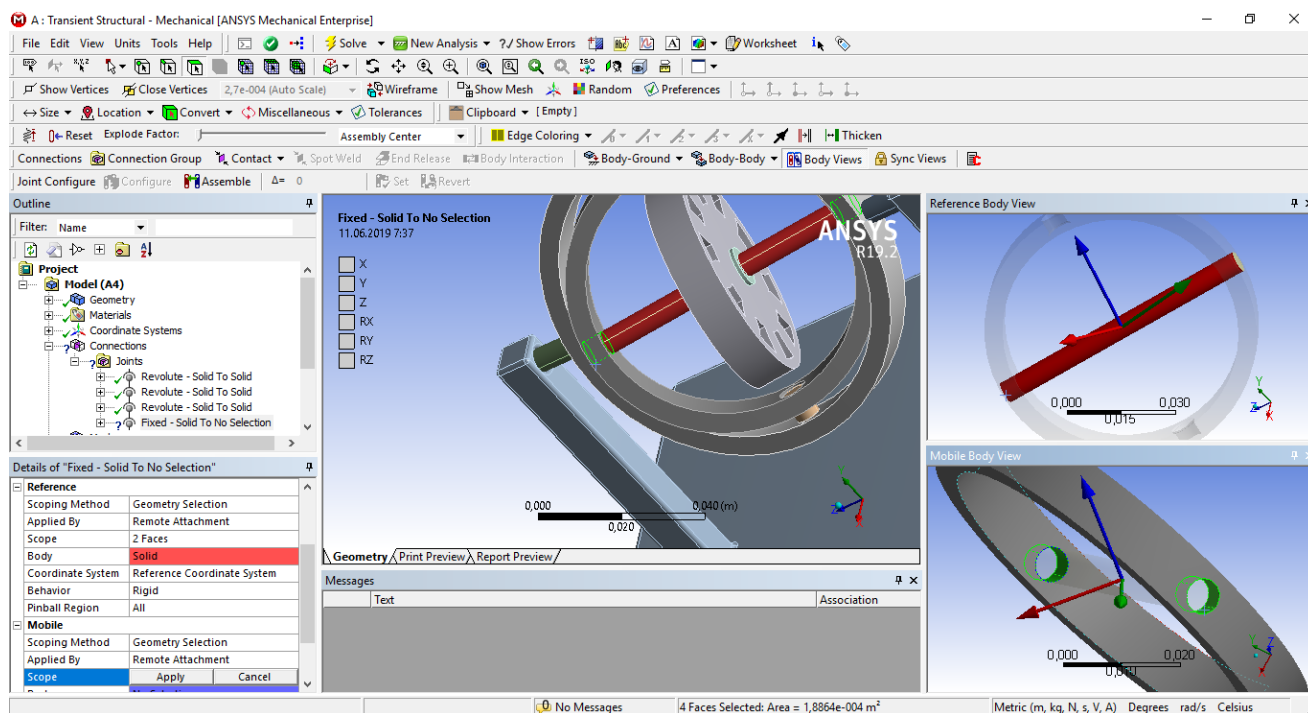


Рисунок 3.1.12 Join Body-Body Fixed між внутрішньою рамкою та ВАЛОМ на якому встановлений ротор гіроскопа

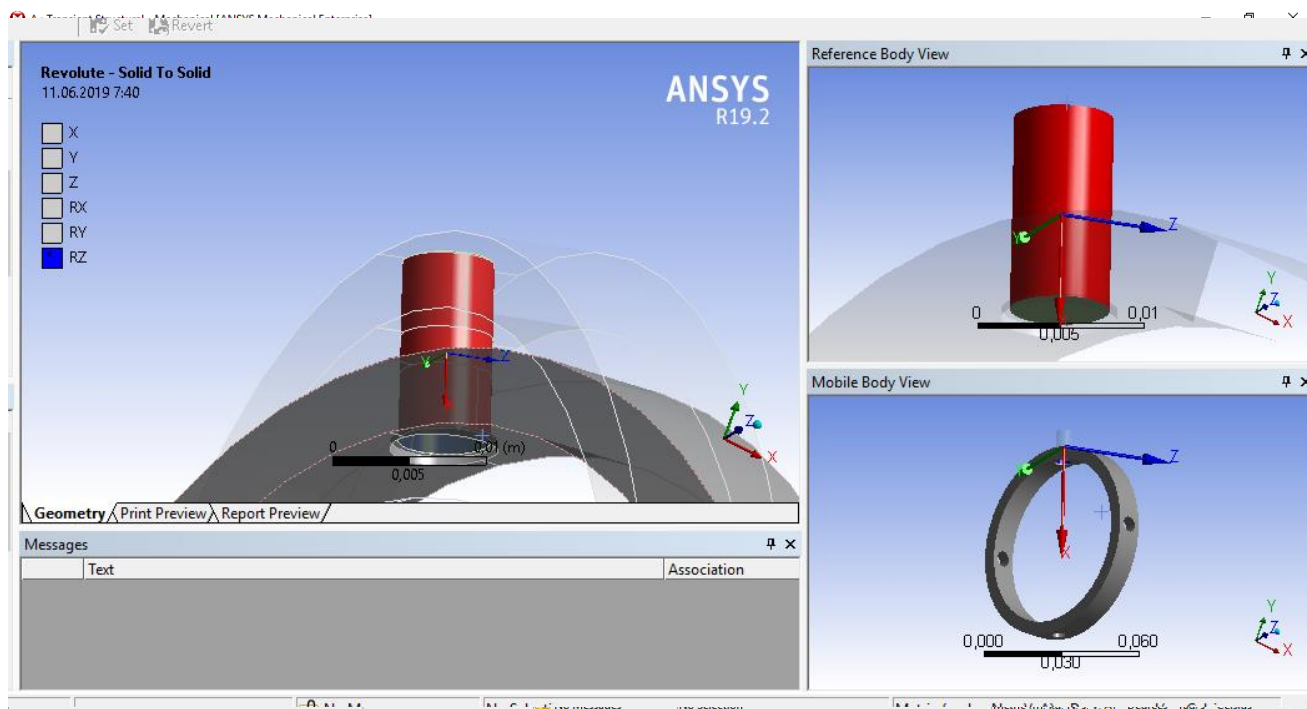


Рисунок 3.1.13 - Join Body-Body Revolute між внутрішньою рамкою та штифтом

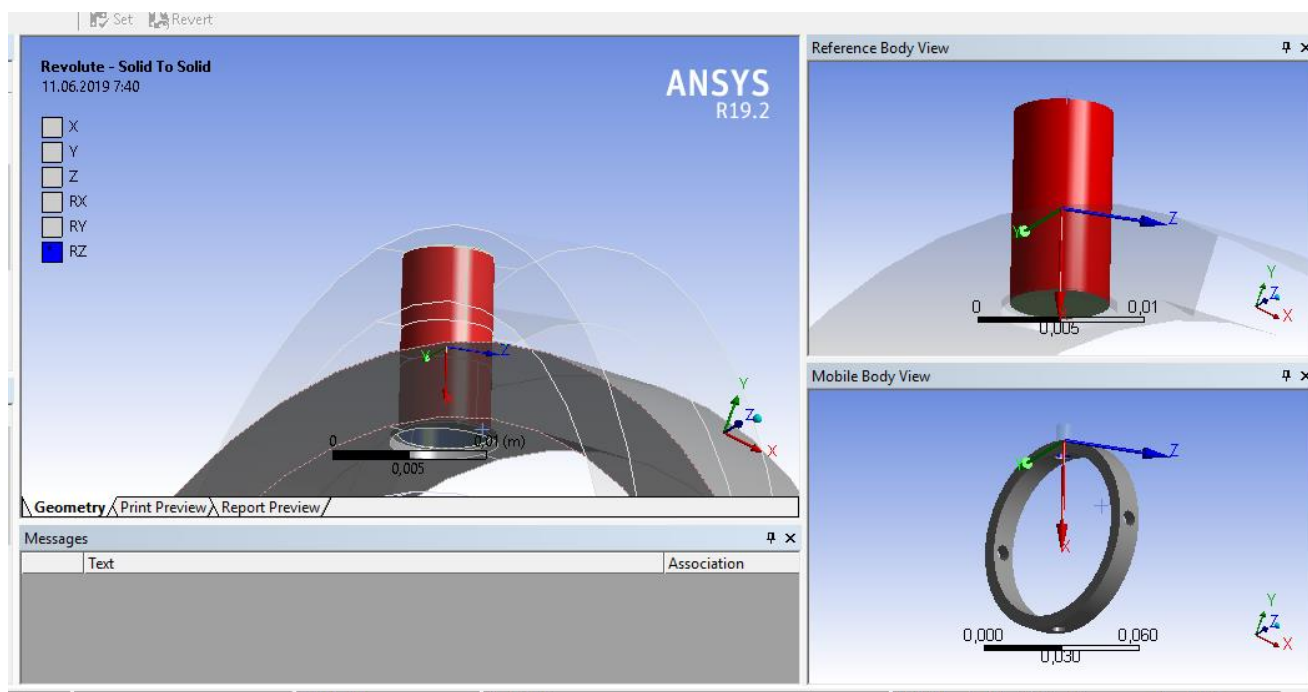


Рисунок 3.1.14 - Join Body-Body Revolute між внутрішньою рамкою та штифтом (випадок 2)

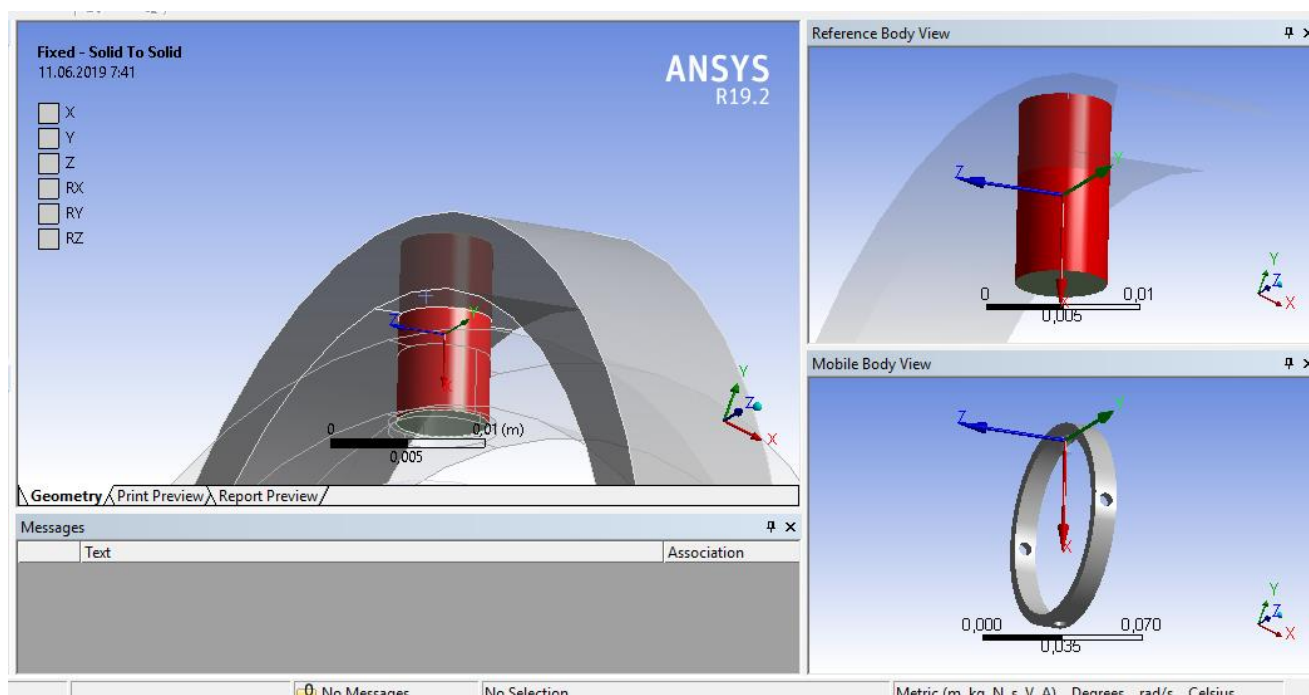


Рисунок 3.1.15 - Join Body-Body Fixed між зовнішньою рамкою та штифтом

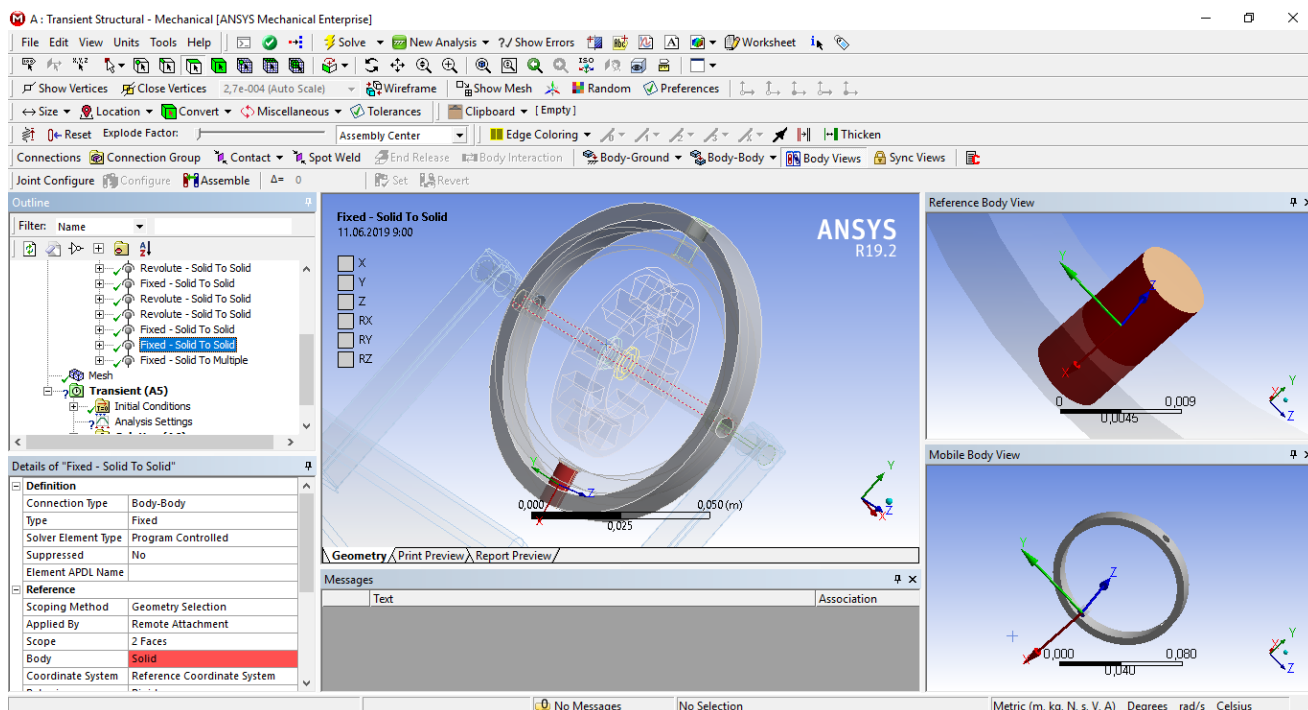


Рисунок 3.1.16 - Join Body-Body Fixed між зовнішньою рамкою та штифтом (випадок 2)

За аналогією зімітуємо третю ступінь свободи, забезпечивши обертання зовнішньої рамки, показано на рисунках 3.1.17, 3.1.18, 3.1.19 та 3.1.20

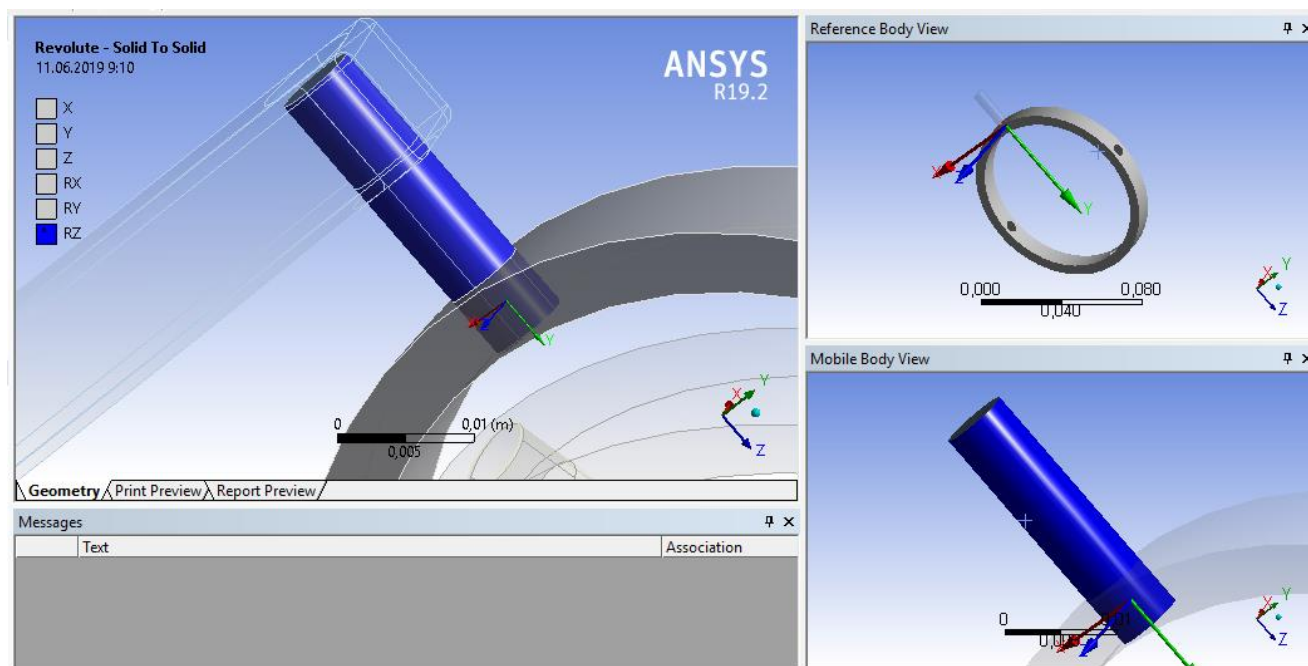


Рисунок 3.1.17 - Join Body-Body Revolute між зовнішньою рамкою та штифтом

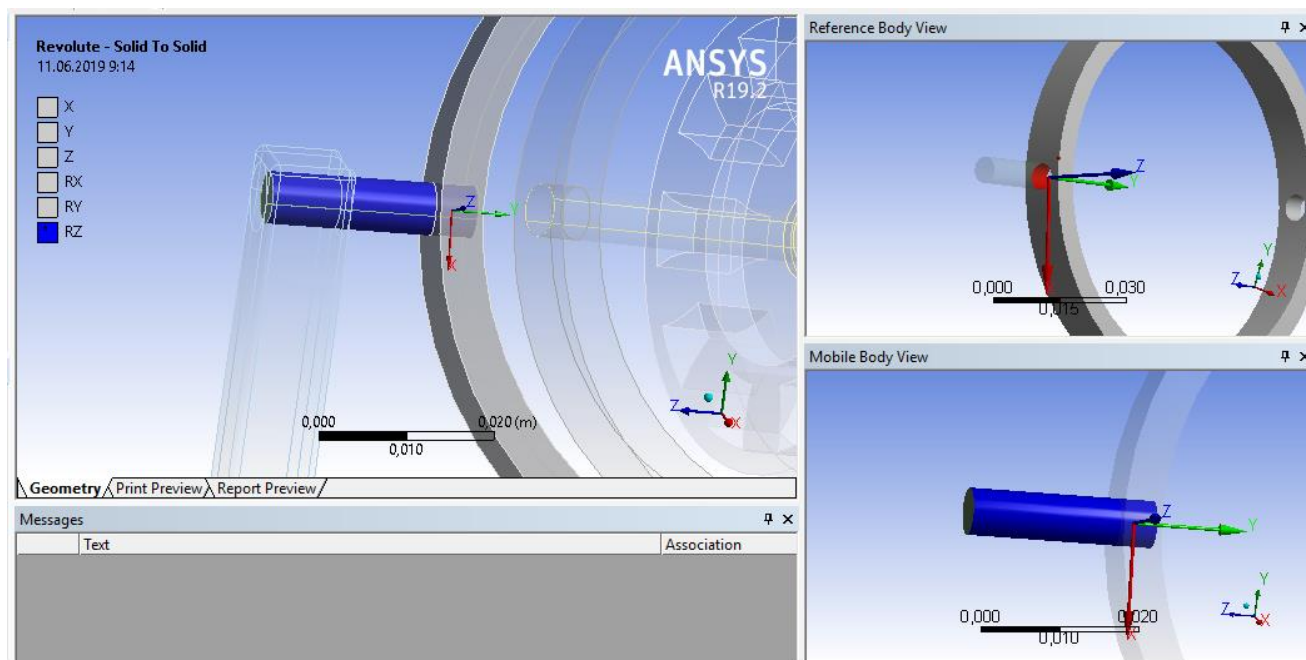


Рисунок 3.1.18 - Join Body-Body Revolute між зовнішньою рамкою та штифтом (випадок 2)

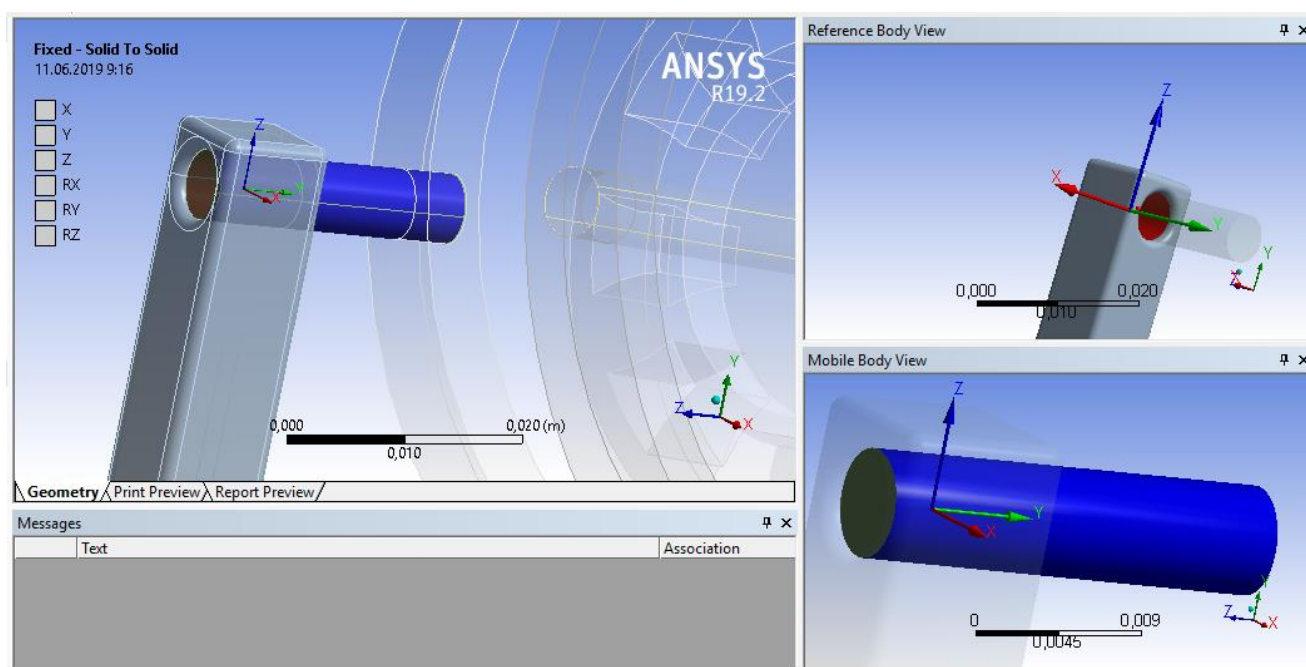


Рисунок 3.1.19 - Join Body-Body Fixed між основою та штифтом

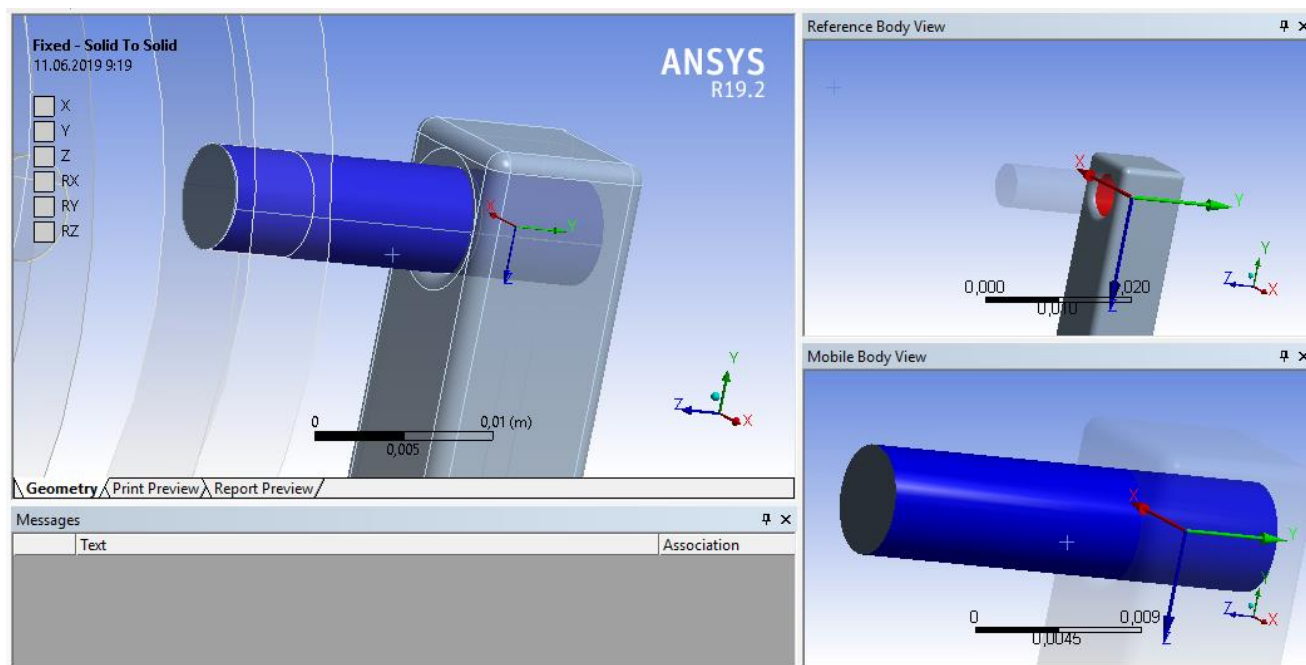


Рисунок 3.1.20 - Join Body-Body Fixed між основою та штифтом (випадок 2)

3.1.2 Встановлення навантажень

Перейдемо до встановлення навантажень. Для початку зафіксуємо основу на якій встановлено гіроскоп. Для цього потрібно додати інструмент Fixed Support. Потрібно клікнути правою кнопкою миші на розділі Transient та в меню вибрати Insert - Fixed Support, потім обрати грань для фіксації (рис. 3.1.21)

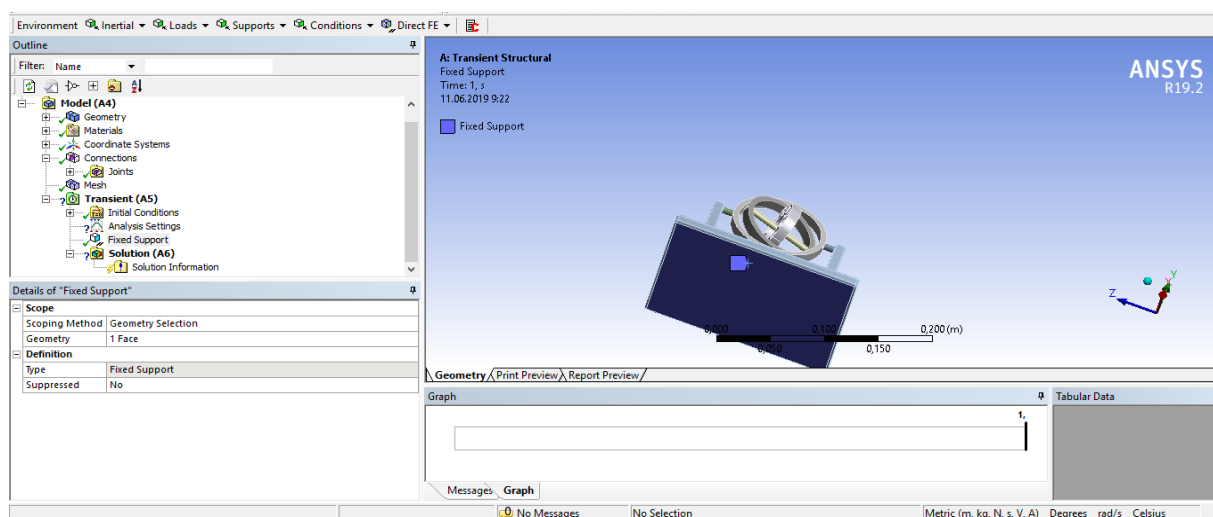


Рисунок 3.1.21 – Фіксація основи за допомогою Fixed Support

Щоб забезпечити обертання ротора потрібно додати інструмент Rotation Velocity – він дозволяє задати постійне обертання з константною швидкістю, налаштування представлені на рис. 3.1.23, параметри обертання на рис. 3.1.22

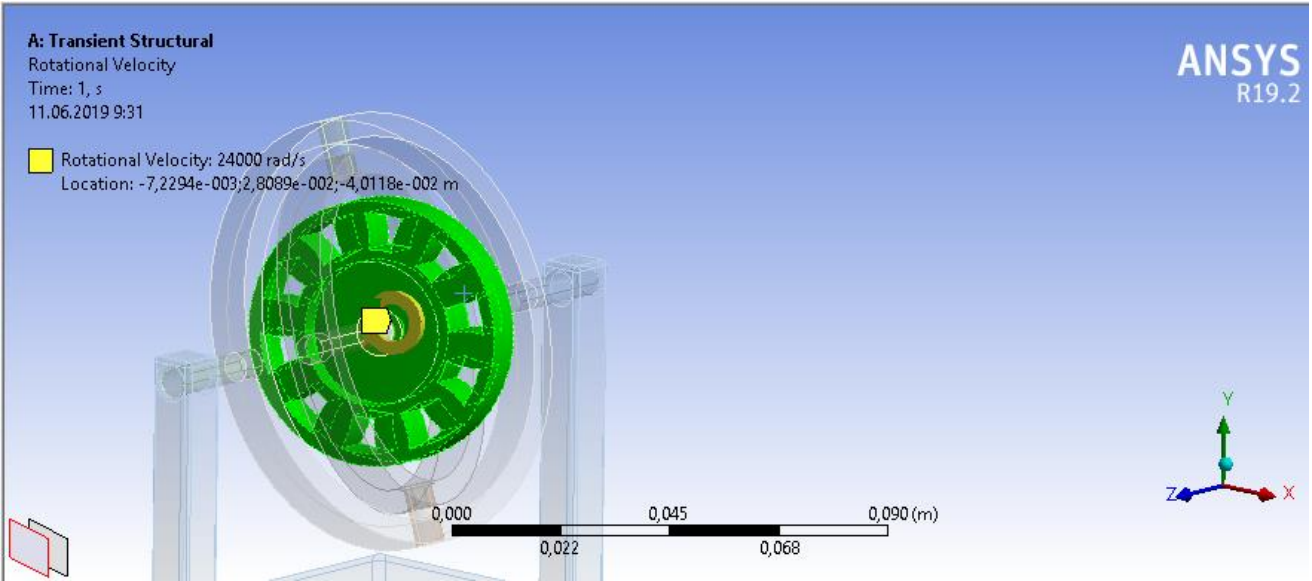


Рисунок 3.1.22 – вибір геометрії для обертання ротора, вектор обертання направлений по осі Z, вибране тіло – ротор гіроскопа

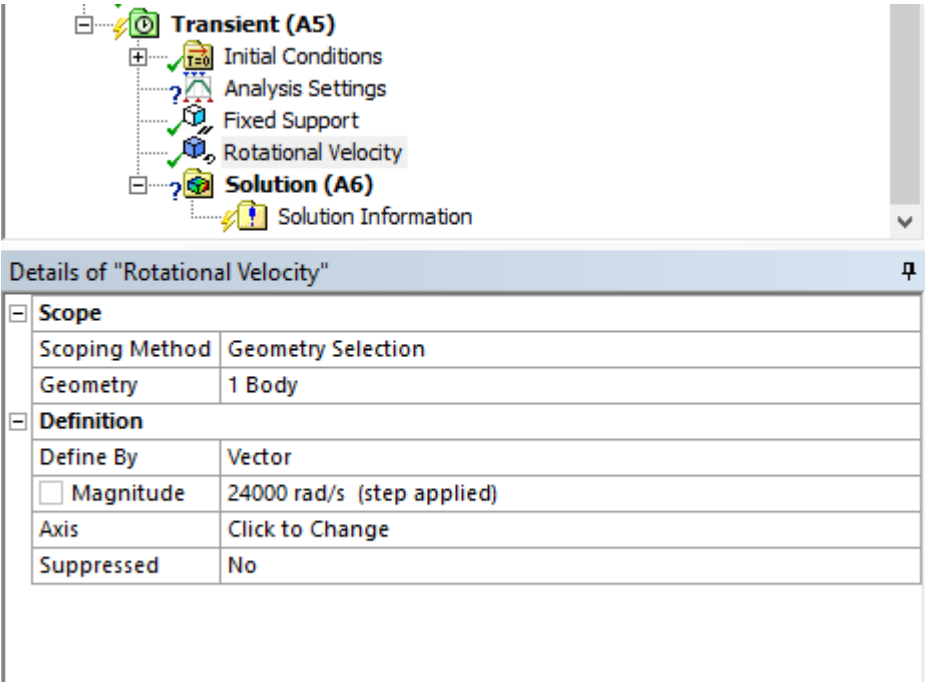


Рисунок 3.1.23 – налаштування Rotation Velocity

Налаштуємо параметри аналізу у вкладці Transient, задавши час моделювання протягом одної секунди та вибравши тип вирішувача Program Controlled (рис. 3.1.24). Тільки даний тип вирішувача дозволяє здійснювати нелінійні обрахунки при обертанні тіл.

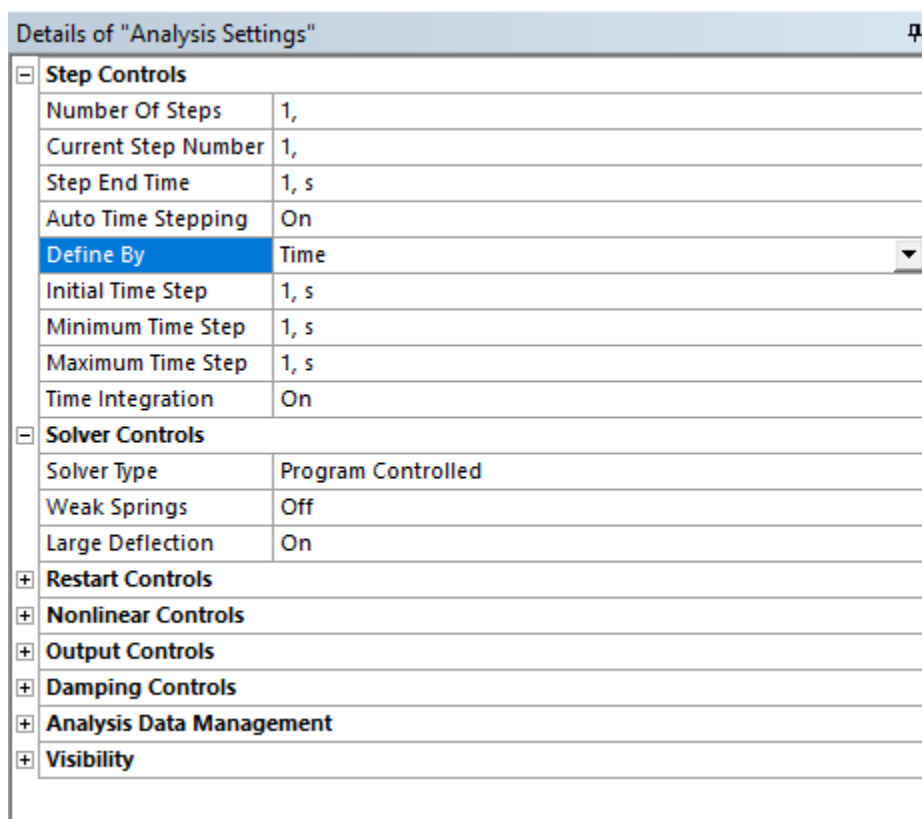


Рисунок 3.1.24 – Analysis Settings

Rotation Velocity доступний для наступних типів аналізу:

- Modal Analysis (Модальний аналіз)
- Static Structural (Статичний структурний)
- Transient Structural (Перехідний структурний)

Також додамо силу яка діє на внутрішню рамку у розмірі 20 Н, за допомогою елемента Force (рис. 3.1.25). Цим ми зімітуємо явище прицесії гіроскопа.

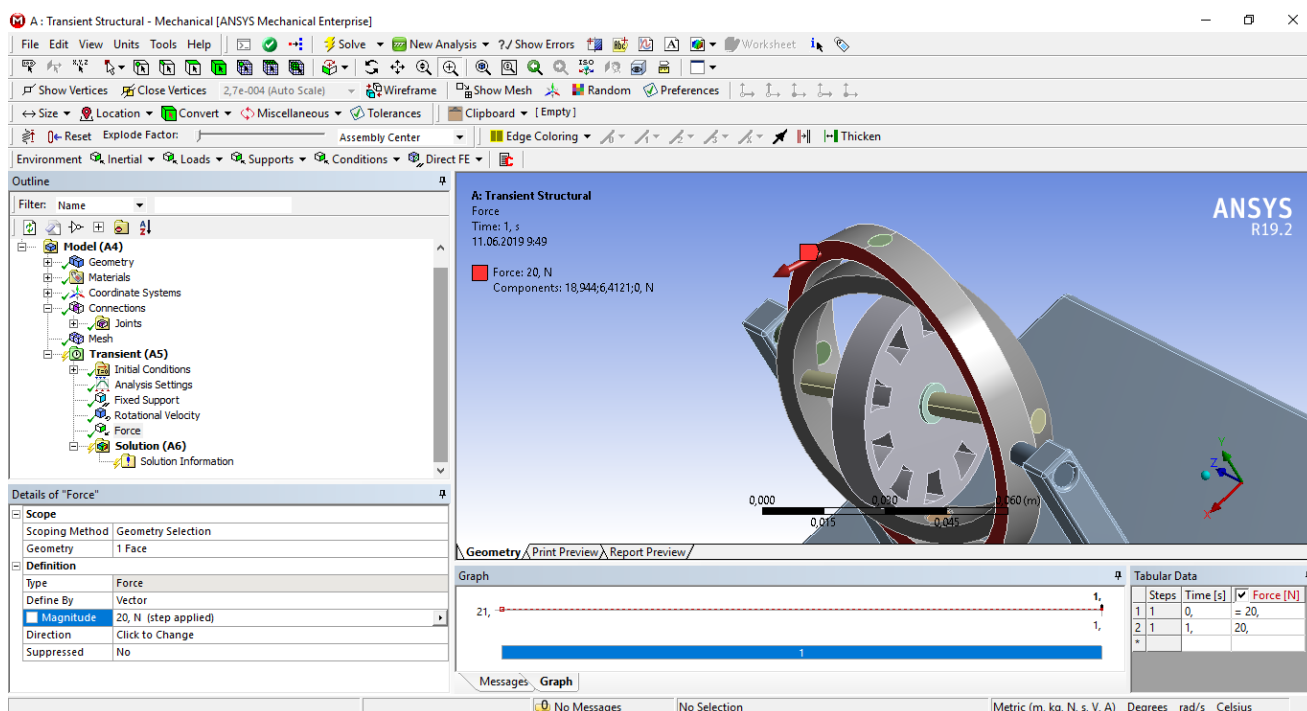


Рисунок 3.1.25 – Force (20 N) що діє на поверхню зовнішньої рамки по заданому вектору для імітації явища прицесії.

3.1.3 Результати

Для результатів розрахунку додамо в розділ Solutions наступні елементи (рис. 3.1.26) :

- Total Deformation - Фізичні деформації, які можуть бути розраховані на деталі або в збірці і всередині неї. Фіксовані опори запобігають деформації; Місця без фіксованої опори зазвичай відчують деформацію щодо вихідного місця розташування. Деформації обчислюються відносно частини або збірки світової системи координат (рис. 3.1.27)
- Total Velocity - швидкість в меридіональній площині може бути представлена осьовими і радіальними компонентами або поперечно-поперечними компонентами (рис. 3.1.28)

- Equivalent Plastic Strain - еквівалентна пластична деформація дає міру величини постійної деформації в інженерному тілі. Еквівалентну пластичну деформацію розраховують з компонентної пластичної деформації. Найбільш поширені інженерні матеріали демонструють лінійні відносини напруги і напруги до рівня напружень, відомого як пропорційний межа. Виходячи за цю межу, відносини напружено-деформовані стануть нелінійними, але не обов'язково стануть нееластичними. Пластична поведінка, що характеризується невірною деформацією або пластичною деформацією, починається тоді, коли напруження перевищують межа текучості матеріалу. Оскільки, як правило, невелика різниця між межею текучості та пропорційною межею, застосування Механічного APDL припускає, що ці дві точки співпадають в аналізі пластичності.

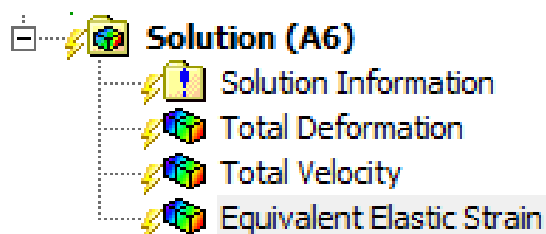


Рисунок 3.1.26 – Розділи для результатів

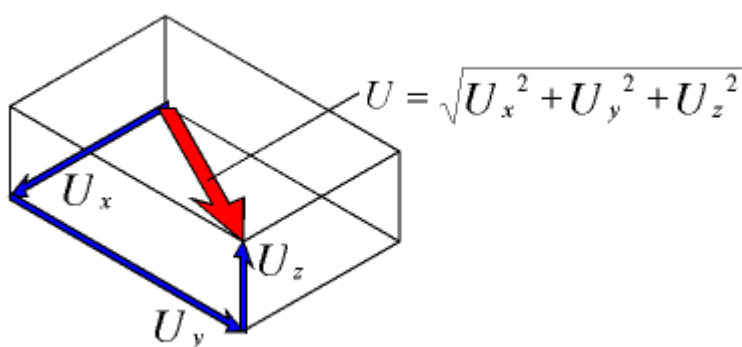


Рисунок 3.1.27 – Червоним показано вектор повної деформації

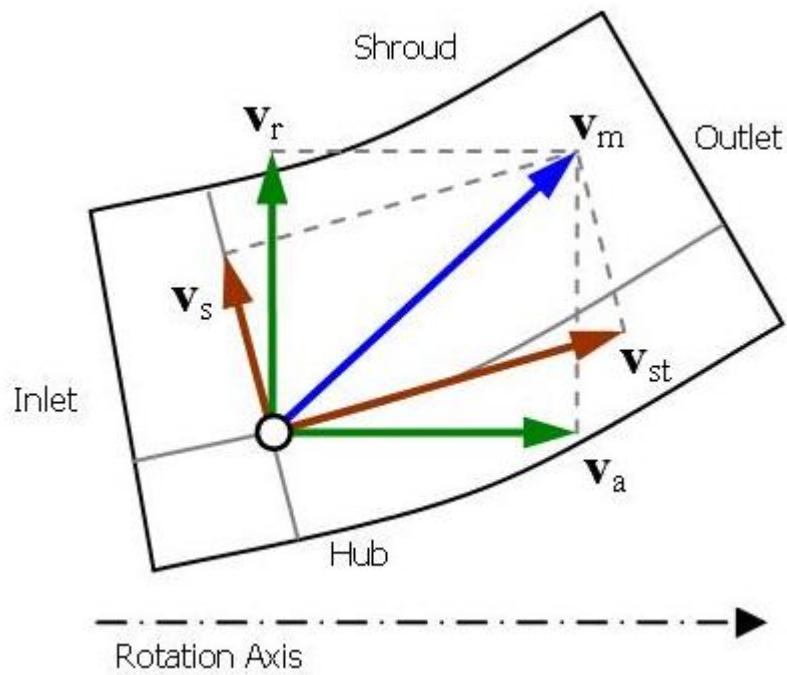


Рисунок 3.1.28 - Компоненти швидкості в меридіональній площині

Для знаходження результатів потрібно натиснути кнопку Solve (F5) на панелі інструментів.

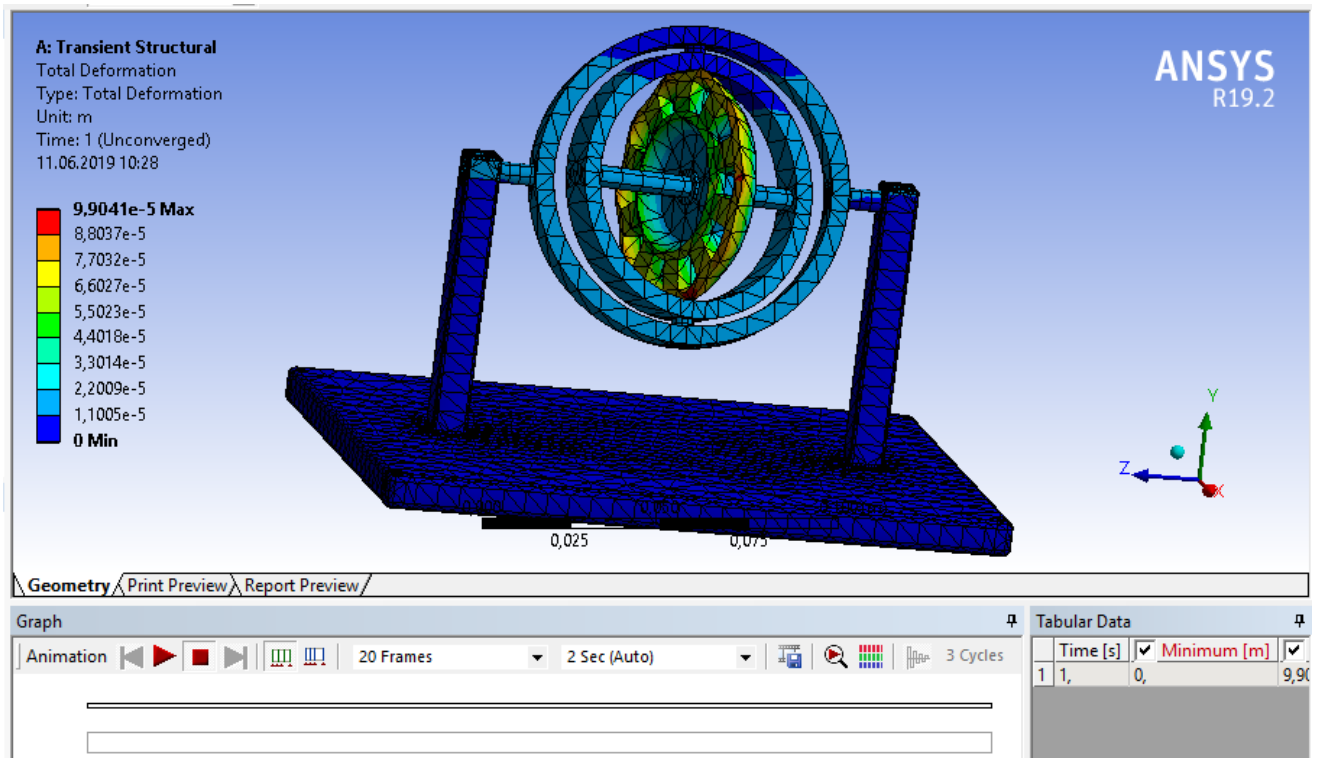


Рисунок 3.1.29 – Результат Total Deformation

На рис. 3.1.29 показаний результат обчислення можливих візичних деформацій для імітаційної моделі. Наглядно показано явище деформації даної конструкції ротора гіроскопа при високій швидкості обертання. При цьому головна вісь гіроскопу намагається тримати своє початкове положення незалежно від моменту прикладеного до зовнішньої рамки та деформації ротора. Проте такі деформації серйозно вплинуть на точність гіроскопу та його термін придатності. Тому важливо перед проектуванням проводити випробування в даному програмному пакеті, це досить заощадить як час так і витрати, допоможе підібрати матеріал який оптимально підійде для поставленої задачі.

На рис. 3.1.30 показана швидкість в меридіональній площині під кінець моделювання

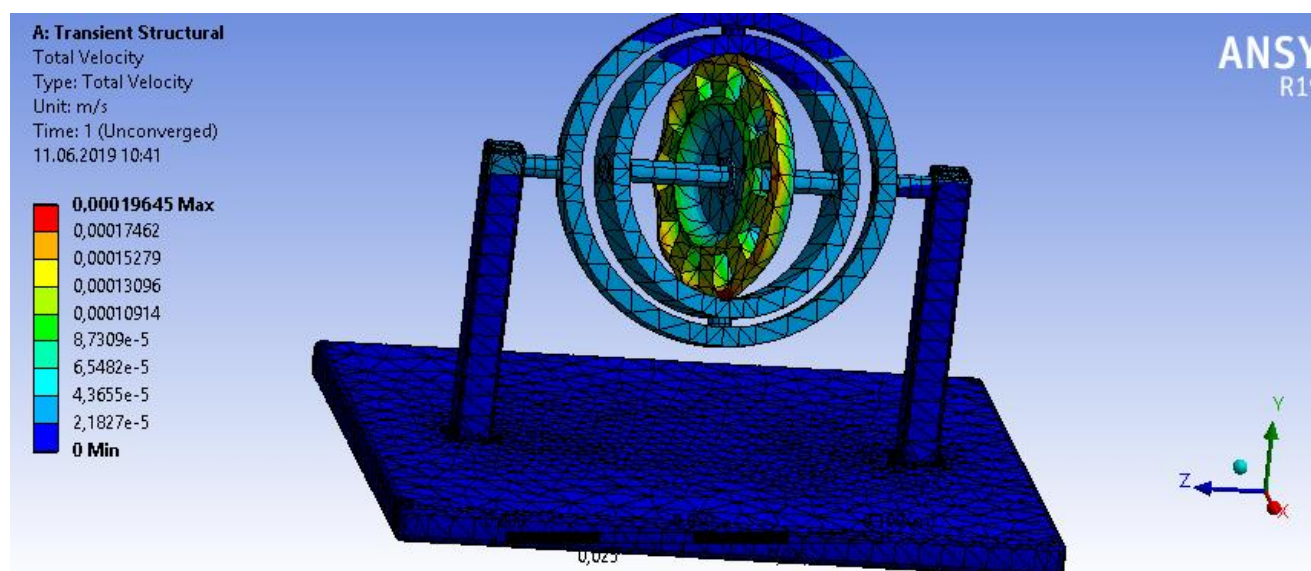


Рисунок 3.1.30 - швидкість в меридіональній площині

На рис. 3.1.1 представлена еквівалентна пластична деформація під кінець моделювання. Такого роду аналіз дає можливість визначити межу текучості потрібного матеріалу для конструкції.

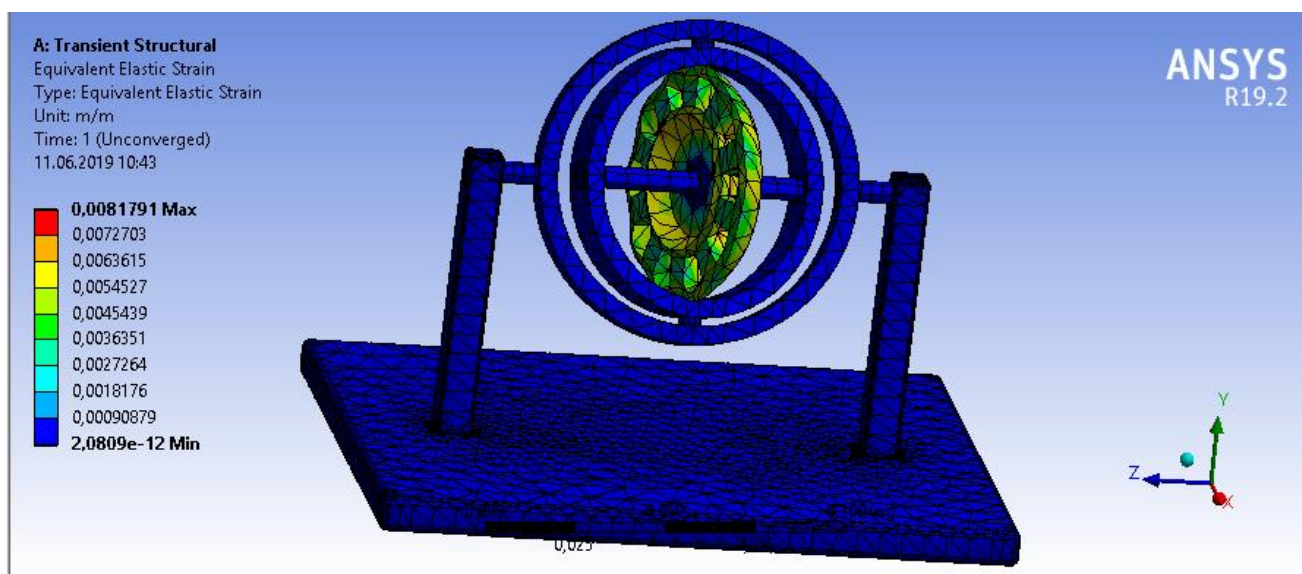


Рисунок 3.1.31 - еквівалентна пластична деформація

3.2 Модальний аналіз

Модальний аналіз (Modal) визначає вібраційні характеристики (власні частоти і форми мод) структури або компонента машини. Він також може служити відправною точкою для іншого, більш детального, динамічного аналізу, такого як перехідний динамічний аналіз, гармонійний аналіз або аналіз спектру. Власні частоти і форми мод є важливими параметрами при проектуванні структури для умов динамічного навантаження. Також можна виконати модальний аналіз на попередньо напруженій структурі, наприклад лопатка турбіни.

Якщо в структурі або машинному компоненті відбувається затухання, система стає затухаючим модальним аналізом. Для затухаючої модальної системи природні частоти і форми мод стають складними.

Для обертової структури або машинного компонента в модальну систему вводяться гіроскопічні ефекти, що виникають в результаті обертальних швидкостей. Ці ефекти змінюють демпфірування системи. Амортизація також може бути змінена при наявності підшипника, який є загальною опорою, що використовується для обертової структури або компонента машини. Еволюцію власних частот зі швидкістю обертання можна вивчити за допомогою результатів діаграми Кемпбелла.

Модальний аналіз може бути виконаний за допомогою розв'язувача ANSYS, Samcef або ABAQUS. Ротординамічний аналіз недоступний для вирішувача Samcef або ABAQUS, тому будемо використовувати вирішувач ANSYS.

Нажаль Rotation Velocity не доступне в Модальному аналізі, коли аналіз пов'язаний зі статичним структурним аналізом.

У нелінійному перехідному аналізі з великими ефектами відхилення (NLGEOM, ON) рух обертання, що передається через команду IC або команду D, сприяє ефекту Кориоліса як частини нелінійного перехідного алгоритму.

Для того щоб змоделювати динаміку гіроскопу в режимі модального аналізу додамо у схему проекту модуль Modal та поділимо геометрію з минулого модулю (рис 3.2.1)

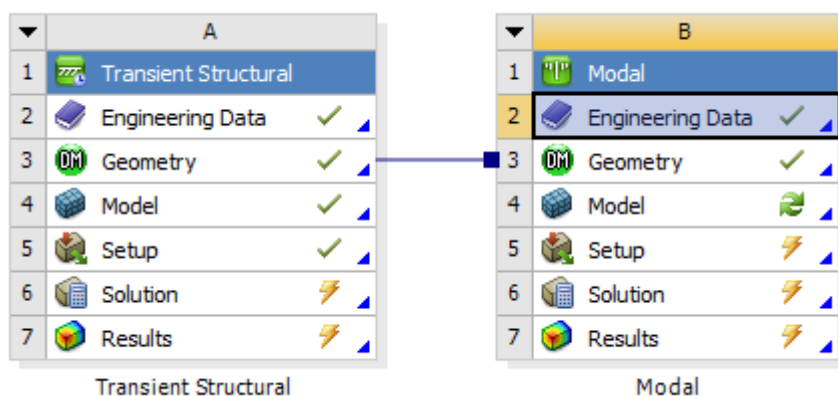


Рисунок 3.2.1 – схема проекту для модального аналізу

2.5.1 Зміна зв'язків

Цього разу не потрібно видаляти зв'язки які були створені за замовчуванням, а просто змінимо їх тип де потрібно змодельовавши ідеальні підшипники без тертя. Для цього в вкладці Model => Contacts відкриємо теку Connections та оберемо контакт ротора та вала на якому він встановлений, та замінимо тип з'єднання з Bounded (з'єднано) на Frictionless (ковзання без тертя) (рис. 3.2.2).

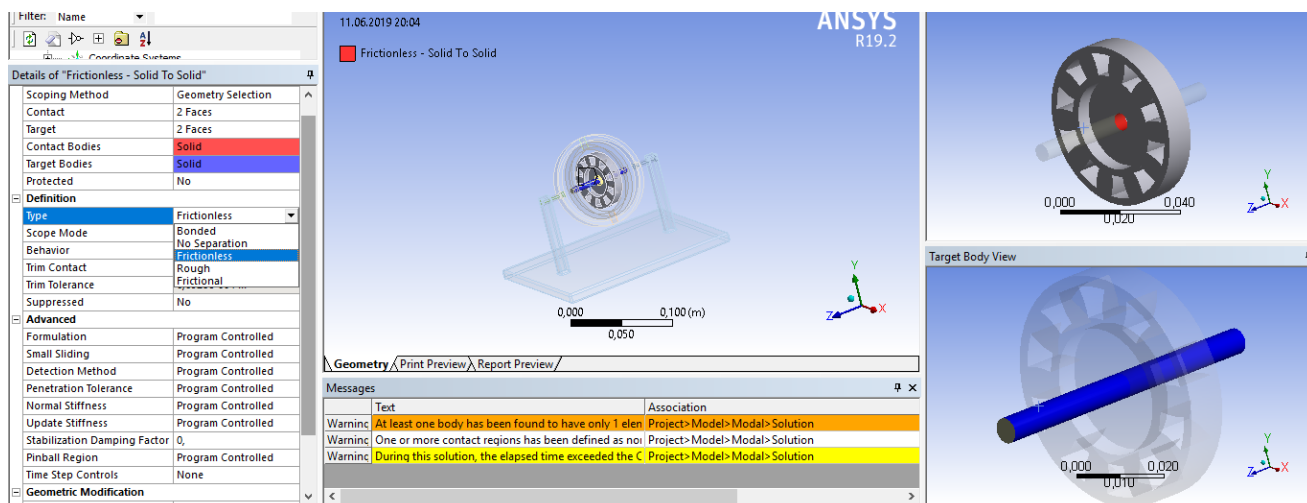


Рисунок 3.2.2 – з'єднання Contact типу Frictionless між ротором гіроскопа та валом

Аналогічно встановлюємо тип контакту Frictionless і для штифтів рамок для імітації підшипників (рис. 3.2.3, рис. 3.2.4)

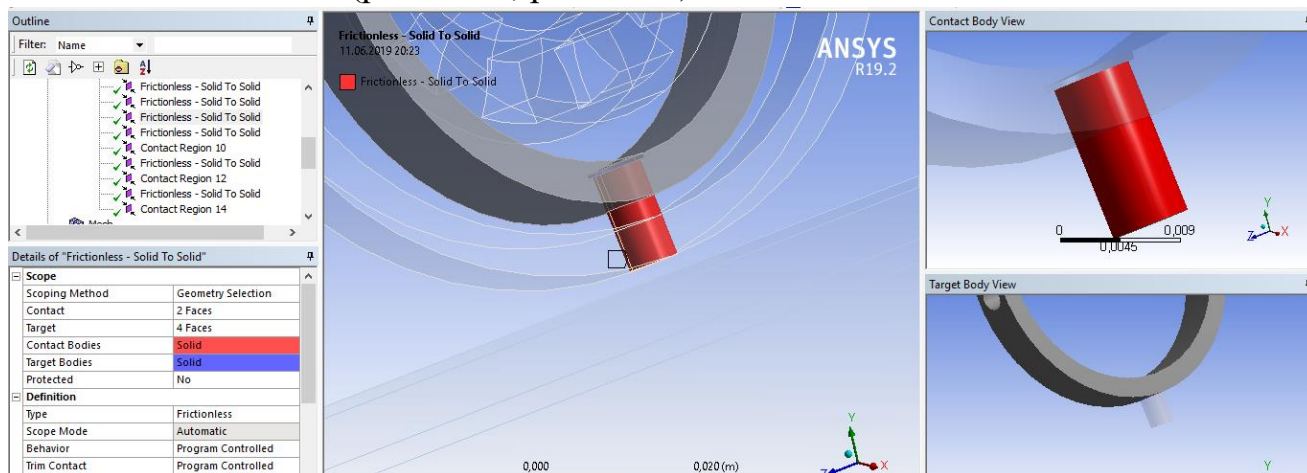


Рисунок 3.2.3 - з'єднання Contact типу Frictionless між внутрішньою рамкою та штифтом

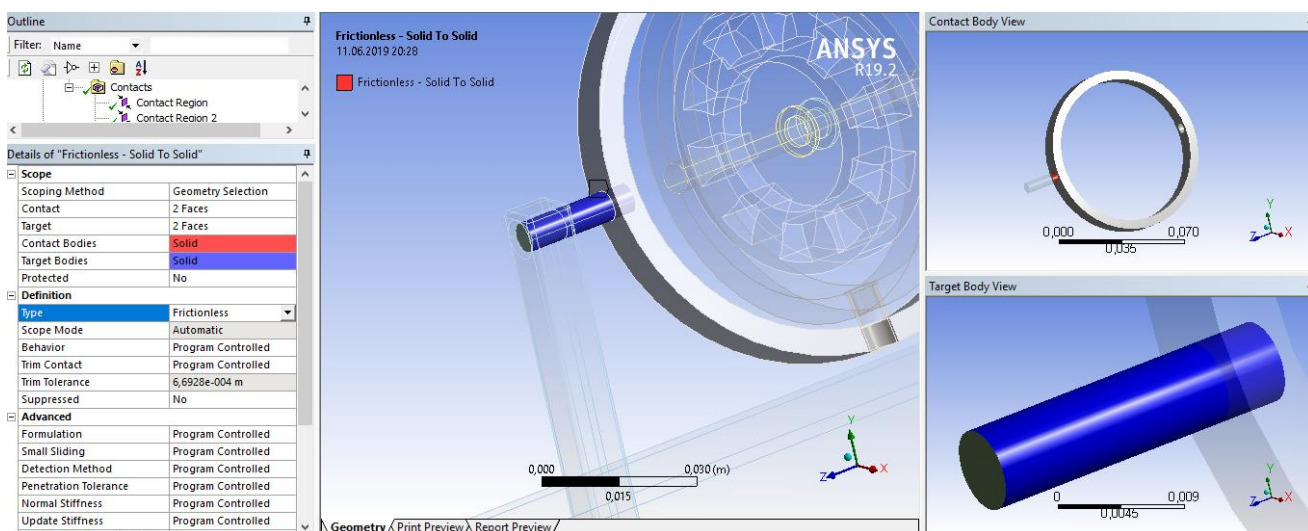


Рисунок 3.2.4 - з'єднання Contact типу Frictionless між зовнішньою рамкою та штифтом

Також потрібно змінити тип контактів на Frictionless між кільцями та ротором які були встановлені на валі для запобігання ковзання ротору по поверхні валу. (рис. 3.2.5, рис. 3.2.6)

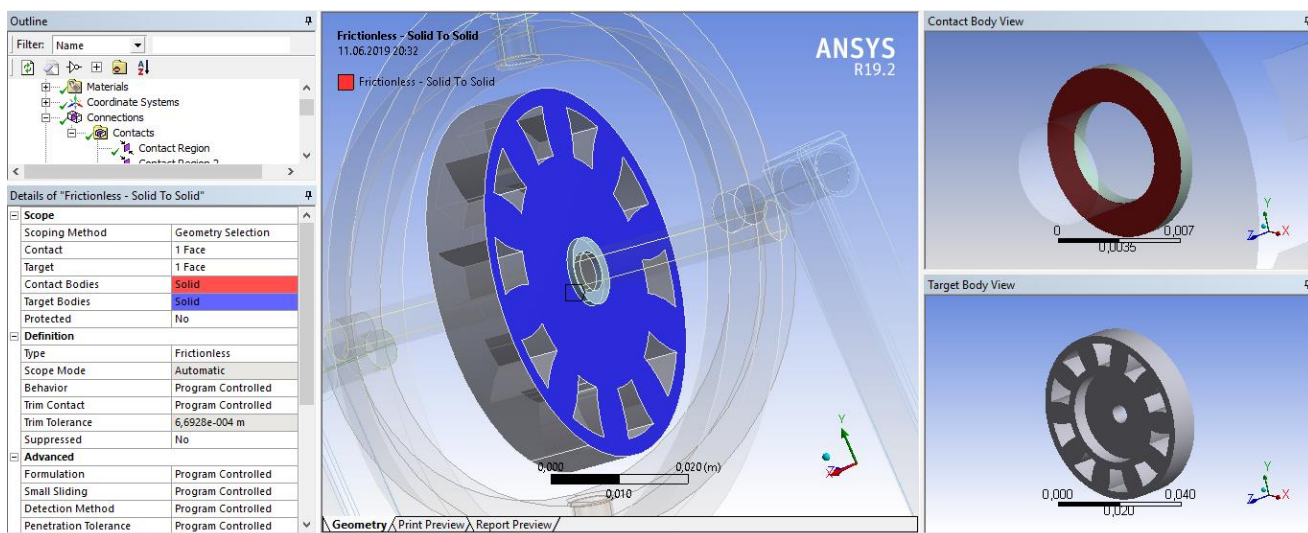


Рисунок 3.2.5 - з'єднання Contact типу Frictionless між кільцем та ротором (варіант 1)

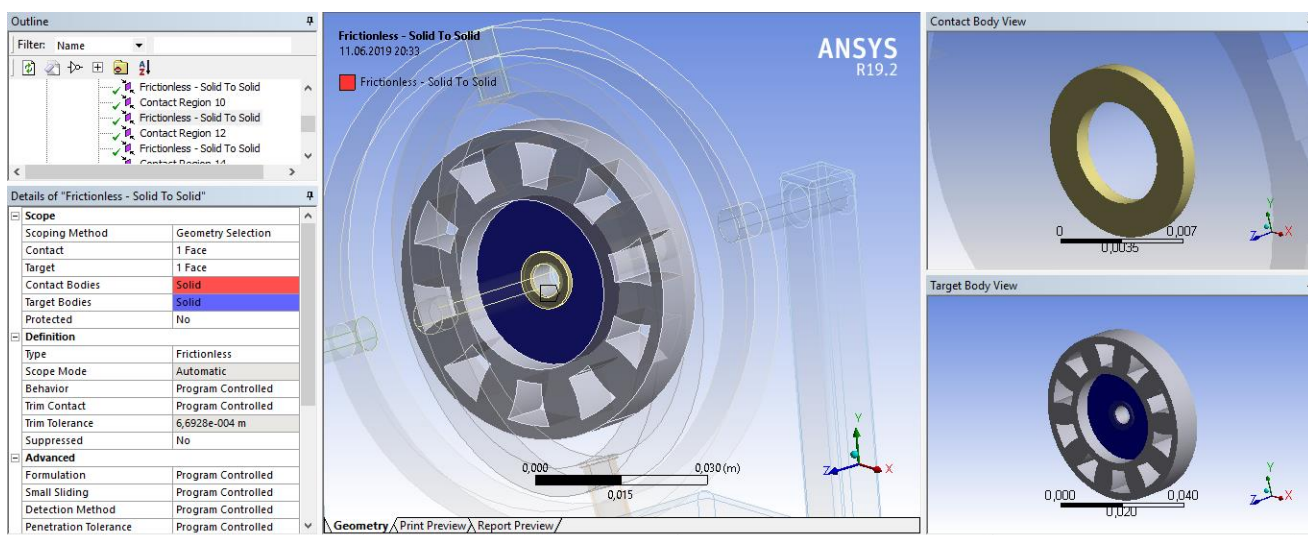


Рисунок 3.2.6 - з'єднання Contact типу Frictionless між кільцем та ротором (варіант 2)

2.5.2 Налаштування обчислювача, задання кручення та результати

Для виконання модального аналізу структури про обертанні потрібно встановити тип вирішувача Program Controlled, дозволити затухання Analysis Settings > Solver Controls > Damped: Yes, Увімкнути ефект Кориоліса для вирішувача (рис. 3.2.7)

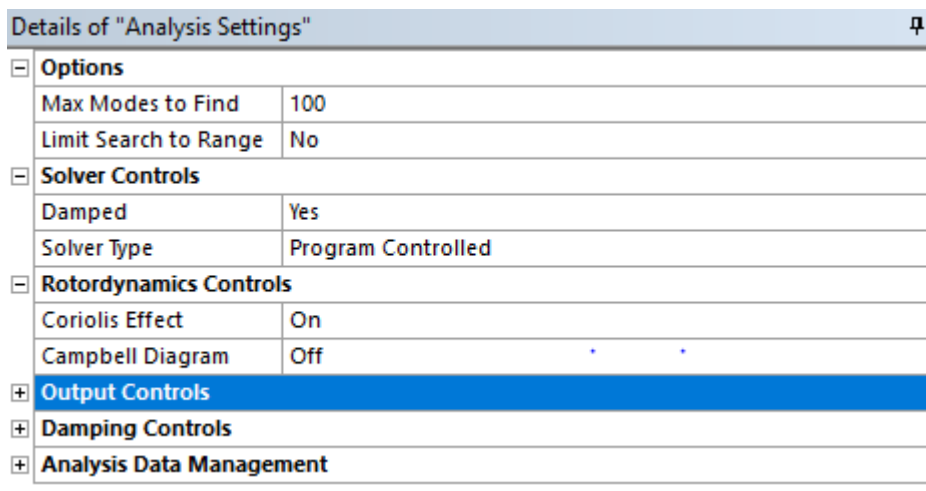
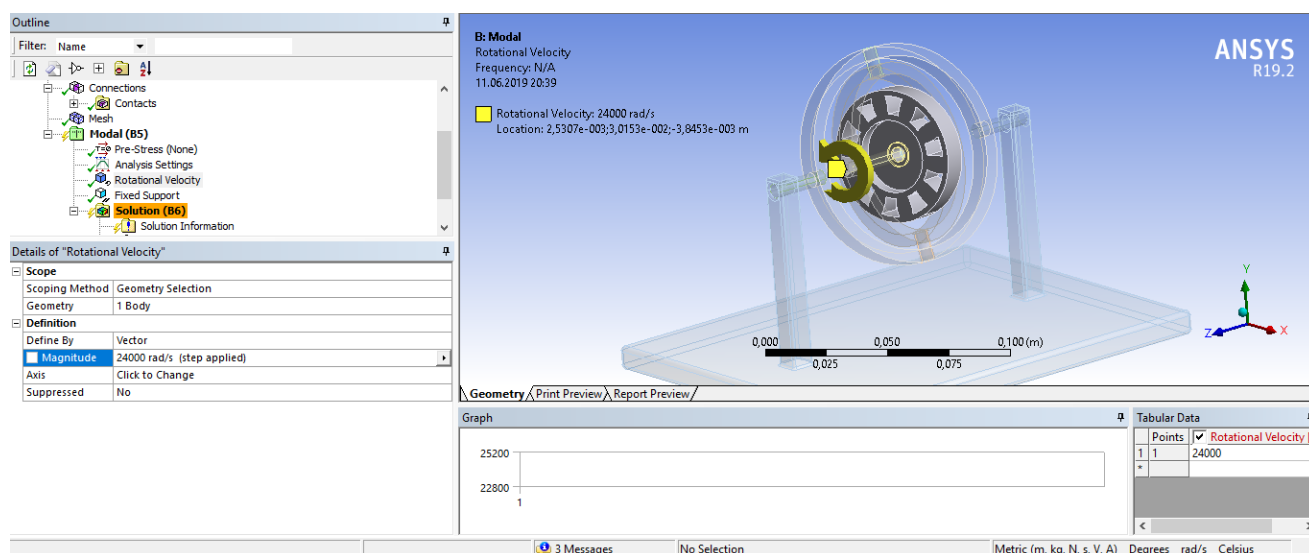


Рисунок 3.2.7 – Налаштування модального аналізу

Швидкість обертання вставляється як навантаження, що визначає величину і ось вектору. Таким чином створимо навантаження Rotation Velocity, зі



швидкістю обертання 24000 рад/с, та вектором направленим по головній осі гіроскопу. (рис. 3.2.8)

Рисунок 3.2.8 – вибір геометрії для обертання ротора, вектор обертання направлений по осі Z, вибране тіло – ротор гіроскопа

Тепер зафіксуємо основу (рис. 3.2.9)

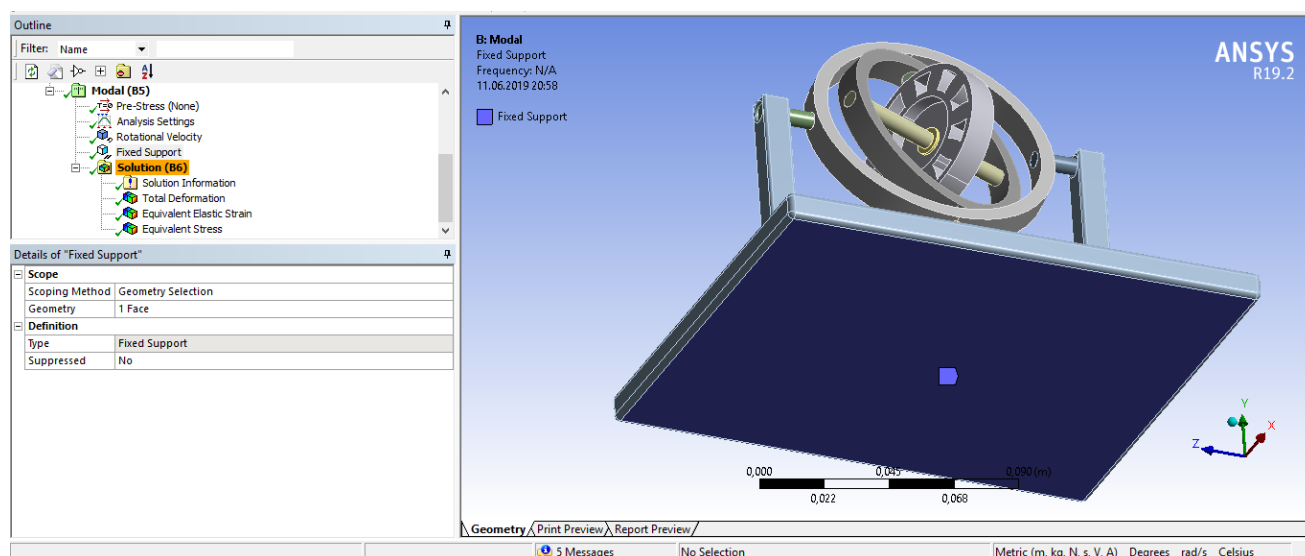


Рисунок 3.2.9 – Фіксація основи за допомогою Fixed Support

Додамо до результатів Total Deformation - фізичні деформації, які будуть обраховані досить не точно, головна ціль отримати наглядне представлення явище прецесії та динаміки гіроскопа. Після обрахунків програмного пакету ANSYS на анімації можна спостерігати явище прецесії гіроскопа (рис. 3.2.10 – рис. 3.2.13)

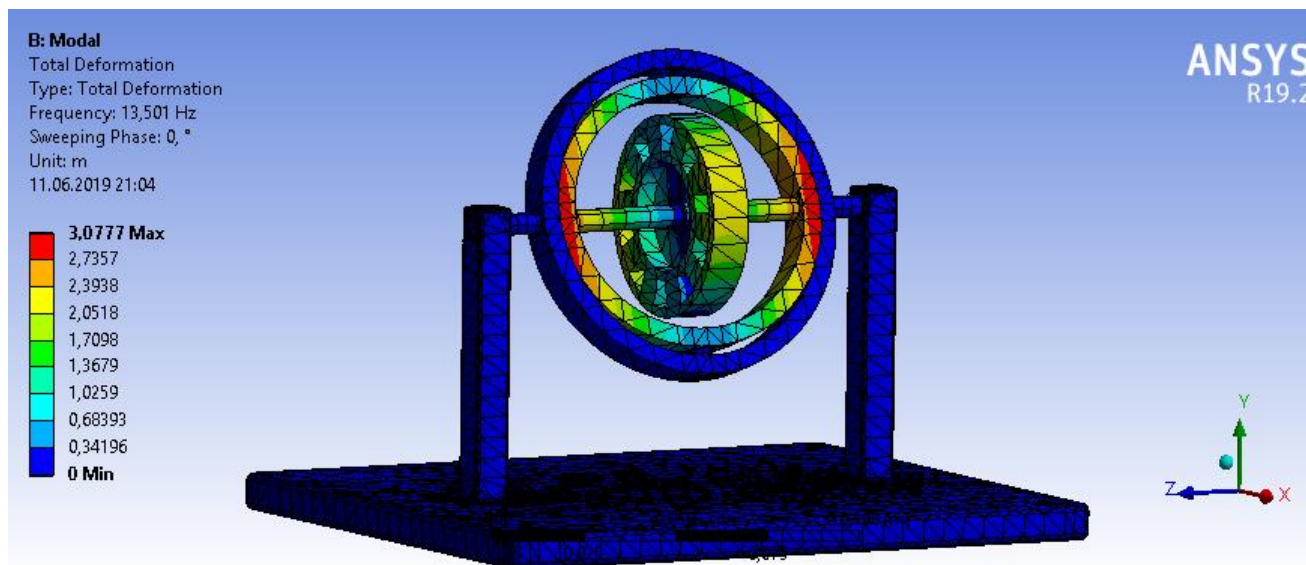


Рисунок 3.2.10 – результат обрахунків (1)

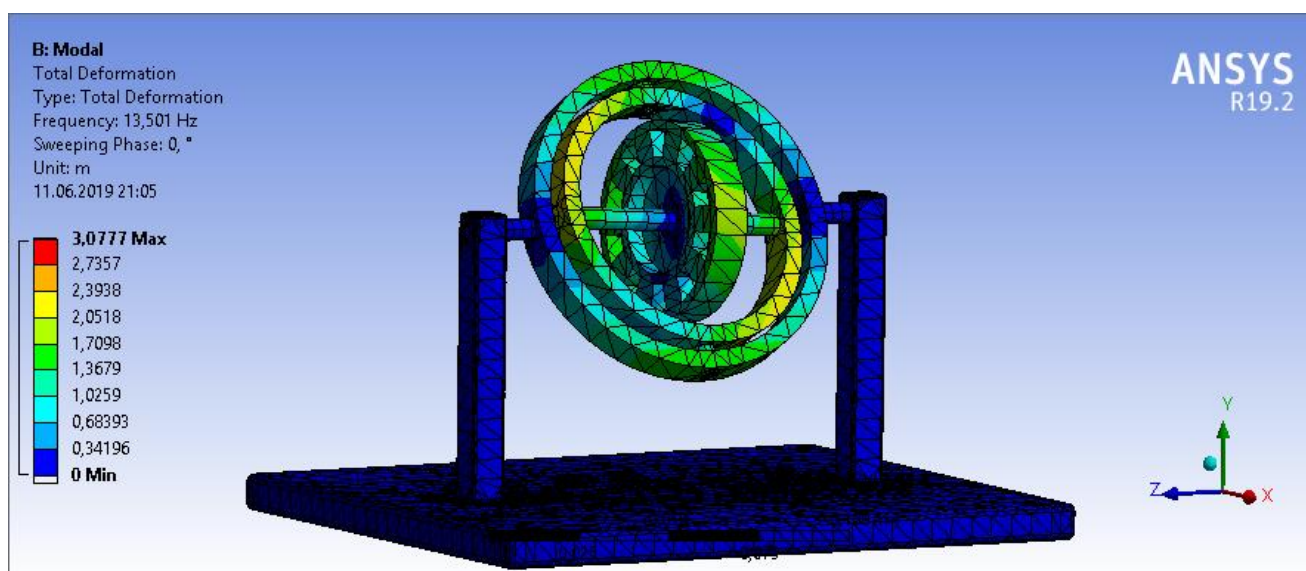


Рисунок 3.2.11 – результат обрахунків (2)

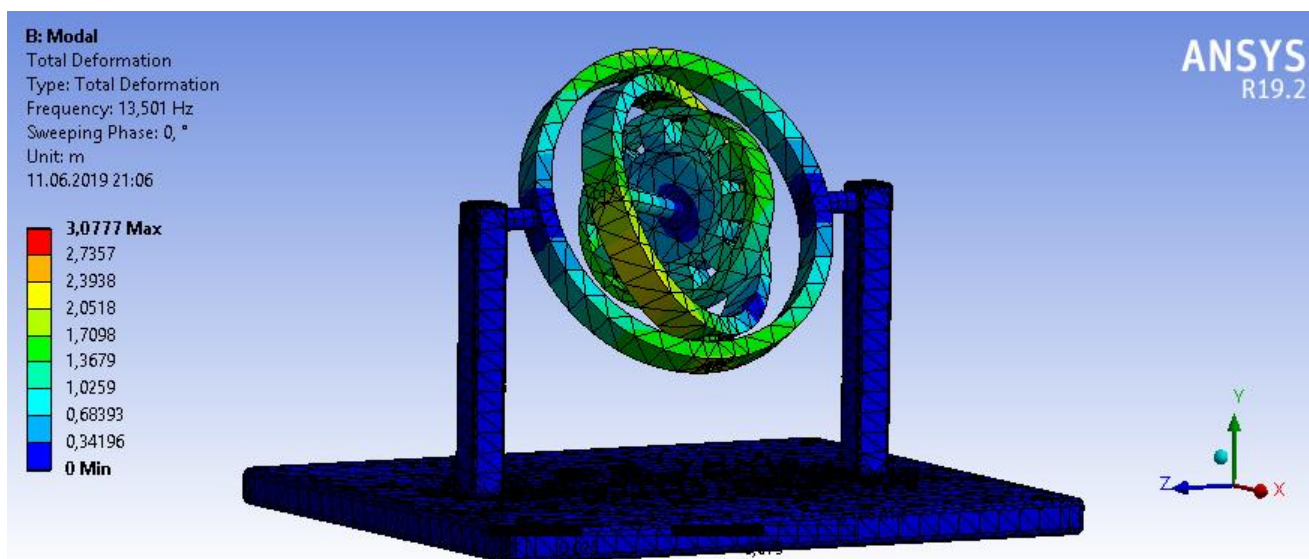


Рисунок 3.2.12 – результат обрахунків (3)

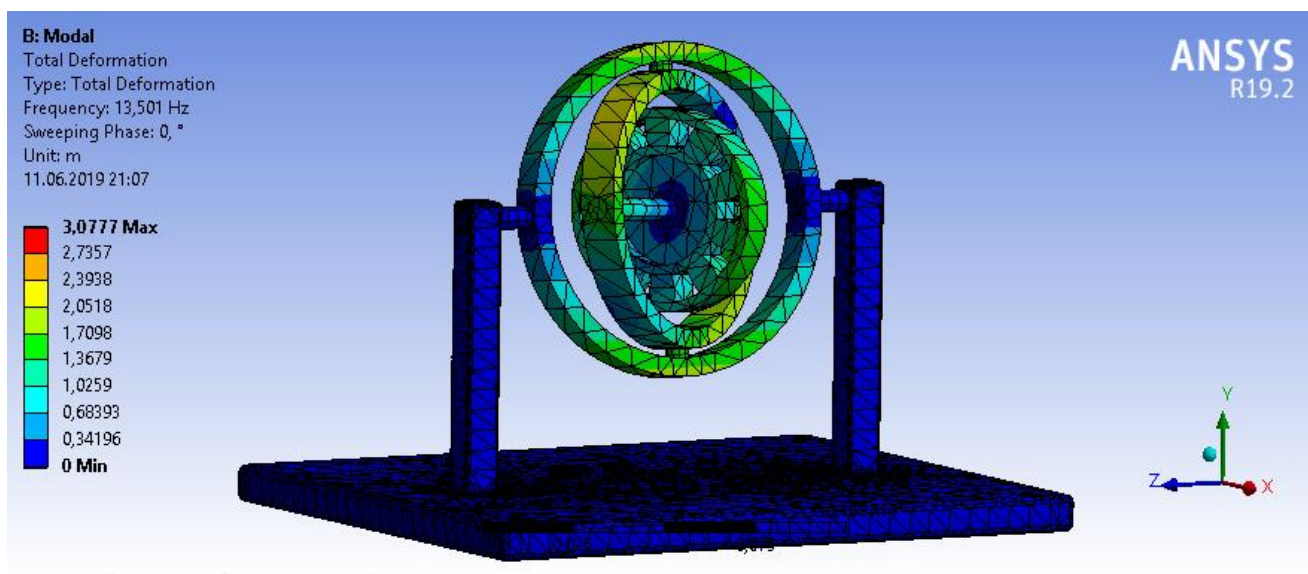


Рисунок 3.2.13 – результат обрахунків (4)

ВИСНОВКИ

На даний момент технології розвиваються досить швидко. Це дає можливість подивитися на класичні задачі під іншим кутом і вирішувати їх швидше. За допомогою імітаційного моделювання можна досить точно оцінити як фізичні властивості матеріалів так їхню динаміку руху під час експлуатації приладу. Наглядно подивитися що буде відбуватися з приладом через конкретний проміжок часу. Це дає змогу правильно прорахувати ризики неполадків та усунути незаплановані проблеми.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF>
2. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов [Текст] / В.В. Гаркуша. – К.: Вища школа, головне в-во, 1985. – 392 с.: іл.
3. Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%B%D1%8C>
4. Имитационное моделирование [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://sernam.ru/book_mm.php?id=5
5. AutoCad [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>
6. Охота Б. О. Моделювання елемента обшивки літака в умовах динамічних збурень, дипломна робота – Київ 2017. - 63 с.
7. SolidWorks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://solidworks.softico.ua/?gclid=Cj0KCQjwov3nBRDFARIsANGsdoHhEbPKovBmOWEXjEfp-jVepRN_7IbFRyepPd9zYDUE_nX2QPIMyQUaAjmLEALw_wcB
8. КОМПАС 3D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kompas.ru/>
9. Catia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/catia/>
10. FlowVision [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://sapr.ru/article/21879>
11. ANSYS documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sharcnet.ca/help/index.php/ANSYS>
12. ABAQUS documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://tesis.com.ru/cae_brands/abaqus/

13. Цибульник, С.О. Використання засобів чисельного моделювання у діагностичних системах. [Текст] : дис. ... магістр: 8.090901 : захищена 23.06.12 : затв. 23.06.12 / Цибульник Сергій Олексійович. – К., 2012. – 176 с. – Бібліогр.: с. 168-174.
14. Rotordynamic analysis Guide, Release 12.0, April 2009. {7}
15. Ansys Command Reference, Release 12.0, 2009. {412} and {1264}
16. Sharcnet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/enus/help/wb_sim/ds_transient_mechanical_analysis_type.html
17. ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения [Текст]. – Введ. 01.09.2006. – М.: «Стандартинформ», 2007. – 12 с.
18. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения [Текст]. – Введ. 01.01.1992. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 14 с.
19. ГОСТ 23501.101-87 Системы автоматизированного проектирования. Основные положения [Текст]. – Введ. 01.07.1988. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 10 с.